

IMPLEMENTACIÓN DE UNA INTERFAZ DE USUARIO BASADA EN
MATLAB PARA LA AUTOMATIZACIÓN DE TÉCNICAS DE CALIBRACIÓN
Y MEDIDAS DE UN ANALIZADOR DE REDES VECTORIAL



Universidad
Politécnica
de Cartagena

**UNIVERSIDAD POLITECNICA DE CARTAGENA
ESCUELA TECNICA SUPERIOR DE
TELECOMUNICACIONES**

**INGENIERÍA TECNICA DE TELECOMUNICACION
ESPECIALIDAD EN TELEMATICA**

PROYECTO FIN DE CARRERA

Implementación de una interfaz de usuario basada en MATLAB
para la automatización de técnicas de calibración y medidas de
un analizador de redes vectorial

Felipe Sabater Martinez

Septiembre, 2012



Universidad
Politécnica
de Cartagena

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE CARTAGENA
ESCUELA TECNICA SUPERIOR DE
TELECOMUNICACIONES

Departamento de Electrónica, Tecnología de Computadoras y
Proyectos
Departamento de Tecnologías de la Información y las
Comunicaciones

PROYECTO FIN DE CARRERA

Implementación de una interfaz de usuario basada en MATLAB
para la automatización de técnicas de calibración y medidas de
un analizador de redes vectorial

Autor: Felipe Sabater Martinez
Director: Dr. Juan Hinojosa Jiménez
Director: Dr. Jose Maria Molina Garcia-Pardo

Septiembre, 2012

TRIBUNAL:

Presidente:

Vocal 1:

Vocal 2:

Secretario:

FECHA DE DEFENSA:

CALIFICACIÓN:

PRESIDENTE

VOCAL 1

VOCAL 2

SECRETARIO

Fdo.:

Fdo.:

Fdo.:

Fdo.:

Autor	Felipe Sabater Martinez
E-mail del Autor	felipe.sabater@gmail.com
Director	Juan Hinojosa Jimenez
Director	Jose Maria Molina Garcia-Pardo
E-mail del Director	Juan.Hinojosa@upct.es
E-mail del Director	josemaria.molina@upct.es
Título del PFC	Implementacion de una interfaz de usuario basada en MATLAB para la automatizacion de tecnicas de calibracion y medidas de un analizador de redes vectorial
Descriptores	Automatizacion, transmision soporte fisico
Resumen	El proyecto consiste en la creacion de un programa para hacer una calibracion de tipo OSM o una calibracion por normalizacion through, tomar medidas y la representacion grafica de la longitud electrica o la distancia entre dos antenas
Titulacion	Ingeniero Tecnico de Telecomunicaciones, Especialidad Telematica
Departamento	Electronica
Fecha de Presentacion	Septiembre de 2012

Resumen

El presente documento es la memoria del proyecto final de carrera, el objetivo del proyecto es la creación de un programa para automatizar la calibración y la toma de medidas con el analizador de red vectorial ZVA 67 de Rohde & Schwarz.

Debido a la cantidad de distintos tipos de calibración existentes y posteriormente mencionadas en esta memoria, no se han podido hacer todos los tipos de calibración. Se han hecho dos tipos de calibración y una serie de medidas para comprobar si se obtienen los resultados deseados.

La creación del programa ha llevado una cierta dificultad debido a que en la carrera de Ingeniería de Telecomunicación especialidad Telemática, no se profundiza en los medios de transmisión tanto como si se hace por ejemplo en la superior con la asignatura de transmisión por soporte físico. Y aunque no es necesario un conocimiento exhaustivo de una tarea para poder crear una herramienta para facilitar dicha tarea, si es necesario un conocimiento como para ser capaz de desenvolverse.

En resumen se han conseguido unos buenos resultados y un buen nivel de automatización, con algunas características útiles como poder guardar la calibración para tomar medidas en distintos días, y se ha creado de forma que algunas funciones puedan ser usadas y pueda ser un programa escalable a la hora de añadir distintos tipos de calibración.

Índice general

Resumen	IX
Índice general	XI
Índice de figuras	XIII
Índice de codigos	XVII
Agradecimientos	XIX
1. Introducción	1
1.1. Objetivos	1
1.1.1. Objetivo general	1
1.1.2. Objetivos específicos	1
1.2. Estructura de la memoria	1
1.3. Origen e historia del analizador de red	2
1.4. VNA	3
1.4.1. Funcionamiento de un VNA	3
1.4.2. Tipos de Analizadores de red segun los datos	4
1.4.3. Necesidad de VNA	5
1.5. Parametros S y cantidades de onda	5
2. Estado del arte	9
2.1. Calibración	9
2.1.1. Tipos de errores	9
2.1.2. Calibración	11
2.1.3. Estándares de calibración	11
2.2. Modelos de error y técnicas de calibración	16
2.2.1. Modelo de 3 términos de error	17
2.2.2. Modelo de error de 7 términos	20

2.2.3.	Resumen distintos modelos de 7 términos de error	21
2.2.4.	Técnicas de calibración incompletas	23
3.	Programa	25
3.1.	Calibración	25
3.1.1.	OSM	26
3.1.2.	Calibración mediante normalización THROUGH	30
3.2.	Medidas	30
4.	Resultados	33
4.1.	Calibración OSM	33
4.1.1.	Calibración	33
4.1.2.	Medida corregida del estándar OPEN	34
4.1.3.	Medida corregida del estándar SHORT	36
4.1.4.	Medida corregida del estándar MATCH.	37
4.1.5.	Medida línea de una longitud 10 mm	38
4.1.6.	Medida línea de una longitud 11 mm	40
4.1.7.	Medida línea de una longitud 12 mm	41
4.1.8.	Medida línea de una longitud 17 mm	43
4.2.	Calibración incompleta normalización THROUGH	44
4.2.1.	Calibración directa, distancia 50 cm	45
4.2.2.	Calibración cable 30 cm, distancia 1m	46
4.2.3.	Calibración cable de 5 m, medida de 3m de distancia	50
5.	Conclusiones	53
	Bibliografía	55
A.	Anexo A	59
A.1.	Material empleado e instalación	59
A.1.1.	Material empleado	59
A.1.2.	Instalación y puesta a punto	67
B.	Anexo B	69
B.1.	Códigos	69
C.	Anexo C	75
C.1.	Listado de acrónimos	75

Índice de figuras

1.1. Tipos de dispositivos ordenados.	3
1.2. Diferencia entre fase y amplitud.	4
1.3. Ejemplo de onda incidente y reflejada.	6
1.4. Ejemplo de reflexion dispositivo de 2 puertos.	6
1.5. Ejemplo de medida adelante.	7
1.6. Ejemplo de medida inversa.	7
2.1. Ejemplos de planos de referencia.	11
2.2. Estándar SHORT.	12
2.3. Estándar OPEN.	12
2.4. Estándar MATCH.	13
2.5. Estándar THROUGH.	13
2.6. Estándar SHORT.	14
2.7. Estándar THROUGH compensado.	15
2.8. Estándar MATCH.	15
2.9. Estándares de calibración microstrip (corto circuito, circuito abierto y adaptación).	16
2.10. Sistema de medidas microstrip.	17
2.11. Metodo de error de 2 puertos.	17
2.12. Carga equivalente 2 puertos.	18
2.13. Modelo de error de 7 términos.	20
3.1. Primera pantalla del programa.	25
3.2. Elección del tipo de calibración.	26
3.3. Introducción de los parámetros.	26
3.4. Pantalla de estándar OPEN.	27
3.5. Pantalla de estándar SHORT.	28
3.6. Pantalla de estándar MATCH.	28
3.7. Medir o guardar calibración.	30

3.8. Pantalla de la seccion de medidas.	31
3.9. Ejemplo de una representación de una medida con calibración OSM.	32
3.10. Ejemplo de una representación de una medida con calibración THROUGH.	32
4.1. Graficas generadas por el programa para el estandar OPEN.	34
4.2. Medida del estándar OPEN sin calibrar.	35
4.3. Medida corregida del estándar OPEN.	35
4.4. Graficas generadas por el programa para el estandar SHORT.	36
4.5. Medida del estándar SHORT sin calibrar.	37
4.6. Medida corregida del estándar SHORT.	37
4.7. Medida del estándar MATCH sin calibrar.	38
4.8. Medida corregida del estándar MATCH.	38
4.9. Graficas generadas por el programa para una linea de 10 mm de longitud.	39
4.10. Medida de una linea de 10 mm sin calibrar.	39
4.11. Medida corregida de una línea de 10 mm.	40
4.12. Graficas generadas por el programa una linea de 11 mm de longitud.	40
4.13. Medida de una linea de 11 mm sin calibrar.	41
4.14. Medida corregida de una línea de 11 mm.	41
4.15. Graficas generadas por el programa para una linea de 12 mm de longitud.	42
4.16. Medida de una linea de 12 mm sin calibrar.	42
4.17. Medida corregida de una línea de 12 mm.	43
4.18. Graficas generadas por el programa una linea de 17 mm de longitud.	43
4.19. Medida de una linea de 17 mm sin calibrar.	44
4.20. Medida corregida de una línea de 17 mm.	44
4.21. Calibración directa.	45
4.22. Medida a 50 cm.	46
4.23. Resultados 50 cm.	46
4.24. calibración usando un cable de 30 cms.	47
4.25. Medida a 1 m de distancia.	48
4.26. Resultados a 1 m de distancia.	48
4.27. Medida a 1 m con chapa en un lateral para generar interferencias.	49
4.28. Resultados a 1 m de distancia con interferencias.	49
4.29. Calibración con cable de 5m.	50
4.30. Medidas a 3 m de distancia con un cable de 5m.	50
4.31. Resultados a 3 m de distancia con un cable de 5m.	51

A.1. Rohde&Schwarz ZVA-67.	60
A.2. Antenas QOM55-65 VRA.	63
A.3. Ejemplo de cables usados.	64
A.4. Sistema de medidas microstrip.	64
A.5. Datasheet sistema de medidas microstrip.	64
A.6. Datasheet sistema de medidas microstrip 2.	65
A.7. Kit de calibración microstrip.	65
A.8. Modelo kit de calibración microstrip.	66
A.9. Datos del kit de calibración microstrip.	66

Índice de codigos

B.1. Codigo inicializacion y entrada de parametros	69
B.2. Codigo donde mide el estandar open	70
B.3. Creación de las variables con las medidas de los estandar	70
B.4. Calculo de los terminos de error, caso ideal	71
B.5. Calculo anterior a sacar los terminos con retardo	71
B.6. Calculo de los terminos de error con retardo	71
B.7. Codigo para guardar la calibración	72
B.8. Codigo que coge la medida de referencia	72
B.9. Codigo donde se hace la normalización	73
B.10. Carga calibración OSM	73
B.11. Carga calibración THROUGH	73
B.12. Calculo de los retardos	74
B.13. Calculo de la longitud	74

Agradecimientos

Desearia agradecer a mi familia la paciencia que han tenido a lo largo de estos años. A mis amigos por su ayuda y a algunos especialmente por sus apuntes. Se que ha sido un camino largo con altos y bajos que deberia de haberse recorrido con mas prisa, pero como dice el dicho, "Lo importante no es llegar primero, sino saber llegar".

Felipe Sabater Martinez

Capítulo 1

Introducción

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo general

El objetivo general del proyecto consiste en la creación de un entorno gráfico en Matlab que permita la automatización en el manejo de un analizador de red vectorial. El programa debe realizar un tipo específico de calibración para posteriormente llevar a cabo medidas precisas. Este entorno gráfico deberá facilitar el manejo del analizador de red vectorial a futuros usuarios inexpertos.

1.1.2. Objetivos específicos

Los objetivos específicos del proyecto son:

- Automatización de dos tipos de calibración sin tener que manipular el analizador de red vectorial salvo para encenderlo.
- Comprobación de los dos tipos de calibración. Para ello, se utilizará medidas de longitudes eléctricas o de distancias entre antenas, dependiendo de la calibración empleada.

1.2. Estructura de la memoria

La memoria esta distribuida de la siguiente forma:

- Una introducción para describir que es un VNA.
- En el segundo capítulo se presenta el estado del arte acerca de la calibración. Consta de dos partes:
 - En la primera parte se explican los distintos tipos de error, los procesos que se emplean para calibrar y los distintos estándares que existen.
 - En la segunda parte se describen dos modelos de términos de error: modelo de 3 términos de error, usando el modelo OSM que será el empleado posteriormente y el modelo de 7 términos de error.

- El tercer capítulo explica el programa y muestra los entornos gráficos que hemos desarrollado para llevar a cabo calibraciones y medidas automatizadas con el VNA.
- En el cuarto capítulo presentamos las distintas pruebas que hemos realizado con el programa descrito en el capítulo anterior y los resultados obtenidos.
- En el último capítulo, se hace una pequeña evaluación de lo que ha sido el proyecto, de los resultados obtenidos, las dificultades encontradas. Además se habla de líneas futuras.

1.3. Origen e historia del analizador de red

El analizador de red vectorial VNA surgió durante los últimos años de la década de los años 50 del siglo pasado. Fue como consecuencia de las necesidades de medidas precisas en el rango de las radiofrecuencias RF y de las microondas. Esto llevó a la introducción de líneas de aire coaxiales de precisión como estándares de referencia para impedancias. Estas líneas usan conductores hechos de metales de muy alta conductividad y el aire como dieléctrico debido a las simples y predecibles propiedades electromagnéticas (es decir permeabilidad y permitividad) del aire en frecuencias de (RF) y microondas. Esto aseguraba que las propiedades de estas líneas fueran muy cercanas a las de las líneas ideales.

También durante los últimos años de la década de 1950, y a través de los años sesenta, se realizaron muchos trabajos para desarrollar conectores coaxiales de precisión para garantizar medidas repetibles y reproducibles en el rango de frecuencias microondas.

Finalmente, al final de la década de 1960, fueron introducidos los primeros analizadores de redes vectoriales (VNA) capaces de proporcionar medidas de gran precisión. Se empezaban a comenzar los trabajos para introducir técnicas seguras para garantizar la efectividad de las medidas conseguidas con analizadores de red vectoriales.

Hubo otros desarrollos clave durante la década de 1970, 1980 y 1990 que mejoraron las medidas usando analizadores de red vectoriales. Como pueden ser:

- Conectores coaxiales de precisión más pequeños, permitiendo ampliar el ancho de banda.
- Conjuntos de calibración y verificación para analizadores de red vectoriales compuestos de dispositivos de alta precisión que permiten la calibración o verificaron las operaciones del analizador de red vectorial.
- Técnicas de calibración de analizadores de red vectorial de gran precisión.
- Analizadores de red vectoriales de 6 puertos utilizados en los laboratorios nacionales de estándares de calibración que proporcionaban un método de medidas independiente para la verificación del funcionamiento de los analizadores de red vectoriales disponibles.

1.4. VNA

Un VNA, es un instrumento empleado para medir y analizar circuitos de radiofrecuencia. Es importante no confundir con un analizador de red refiriéndose a los analizadores de redes de ordenadores, cuando se inventaron los analizadores de red no existían las redes de ordenadores, por eso el nombre no es mas específico.

Los analizadores de red vectorial son empleados para medir todo tipo de dispositivos (Figura 1.1), desde filtros sencillos hasta complejos módulos usados en comunicaciones satélites, dependiendo de las características del dispositivo, puede probar dispositivos activos (generan una excitación eléctrica, ganancia o control) o pasivos (interconectan los distintos componentes activos asegurando la transmisión de la señal eléctrica o modificando su nivel). También miden dispositivos con distintos comportamientos tanto lineal como no lineal, para esto es capaz de usar técnicas de barrido en frecuencia y de barrido en tiempo.

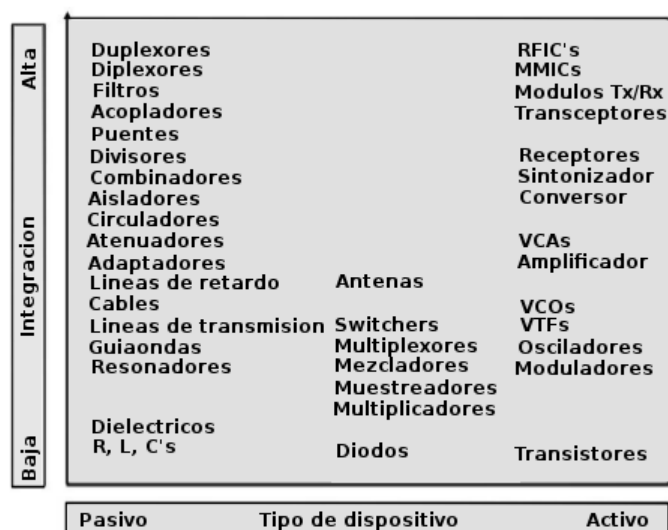


Figura 1.1: Tipos de dispositivos ordenados.

1.4.1. Funcionamiento de un VNA

Un analizador de red vectorial emite una señal senoidal de prueba que es aplicada al dispositivo de prueba, si consideramos que el dispositivo tiene un comportamiento lineal la respuesta será otra señal senoidal. El analizador mide la diferencia de amplitud y de fase entre ambas respuestas (Figura 1.2) [1].



Figura 1.2: Diferencia entre fase y amplitud.

1.4.2. Tipos de Analizadores de red segun los datos

VNA. Analizador de red vectorial

Mide la diferencia en amplitud y fase entre la señal de prueba y la respuesta del dispositivo. Son los más complejos y más caros. Este proyecto se ha realizado con un analizador de este tipo.

Dentro de los VNA , también existen dos tipos de analizadores de red vectoriales dependiendo del principio en que están basados.

- Basados en el principio de homodino, tienen un único oscilador que provee la señal y es también quien procesa la respuesta. Son más económicos, tienen limitaciones técnicas y son utilizados para medidas simples.
- Basados en el principio heterodino. El oscilador local usa una frecuencia que es distinta a la frecuencia recibida.

SNA. Analizador de red escalar

Un analizador de red escalar solo mide la diferencia en amplitud. Son mas simples y mas baratos que los vectoriales.

Ventajas de los VNA

- Solo un VNA puede desarrollar un completo sistema de corrección de errores. Este sistema compensa los errores de medición sistemáticos con la mayor precisión.
- Solo las medidas vectoriales pueden ser transformadas al dominio del tiempo de forma unívoca. Mayor oportunidad de interpretar y procesar datos.
- La técnica de empotrado es una técnica de procesamiento especial que nos permite usar configuraciones y dispositivos que no están físicamente presentes. Para estas técnicas se necesitan datos vectoriales.
- Para representar un diagrama de Smith. Es necesario tener el coeficiente de reflexión de forma vectorial.

1.4.3. Necesidad de VNA

Antes de terminar este capítulo sobre el analizador de red y comenzar más detalladamente con las medidas y los distintos parámetros capaces de medir, un pequeño resumen con algunas de las razones por las que se prueban los dispositivos o componentes con analizadores de red.

- Los componentes pueden ser usados como componentes de otros sistemas de radio-frecuencia mayores por lo que es necesario saber que componente es el que falla para una perfecta modularidad.
- Garantizar que no haya distorsión en una señal de comunicación. Para asegurarnos de ello tenemos en cuenta ciertos parámetros de la señal.
 - Señales lineales: amplitud constante, fase/lineal, retardo constante de grupo, etc.
 - Señales no lineales: armónicos, intermodulación, compresión, conversión AM-PM
- Garantizar una buena absorción y aprovechamiento de la potencia. Esto es muy importante a la hora de por ejemplo la producción de antenas.

Para conocer mas sobre la historia de los Analizadores de red vectorial son interesantes los siguientes artículos:

- Agilent Network analyzer Basics <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5965-7917E.pdf>. [2].
- Calibración VNA www.mtt-archives.org/dl/index.php?S19_Rumiantsev.pdf. [3].

1.5. Parametros S y cantidades de onda

En esta sección se explican las bases para poder entender los resultados conseguidos por el analizador de red vectorial. Para entender mejor el funcionamiento de las líneas de transmisión o del soporte físico se aconseja echar un vistazo a los libros Líneas de Transmisión, Guías de Onda y Cavidades Resonantes [4] y Transmisión por Soporte Físico [5]. Estos libros son los usados en la asignatura Transmisión por soporte físico de Ingeniería de Telecomunicación. Para caracterizar un sistema de RF se pueden usar distintos parámetros, nosotros usaremos los parámetros S y la cantidades de onda. Para empezar la caracterización de un sistema lo primero que tenemos que distinguir es entre la onda incidente y la onda reflejada (Figura 1.3) [1].

- Onda incidente: Se propaga desde el analizador hacia el Dispositivo de prueba. (DUT).
- Onda reflejada: Se propaga en direccion opuesta desde el DUT hasta el analizador.

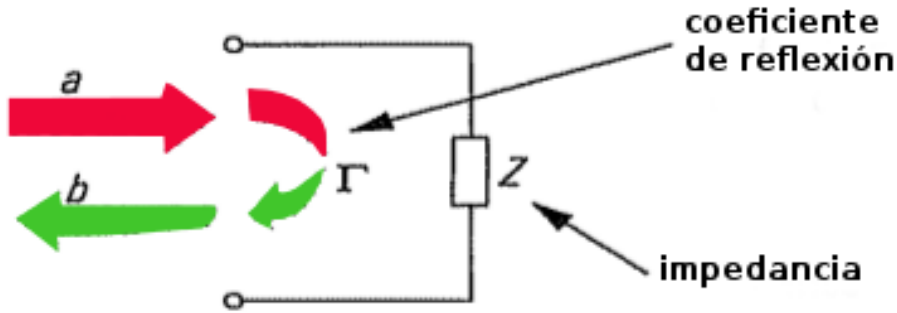


Figura 1.3: Ejemplo de onda incidente y reflejada.

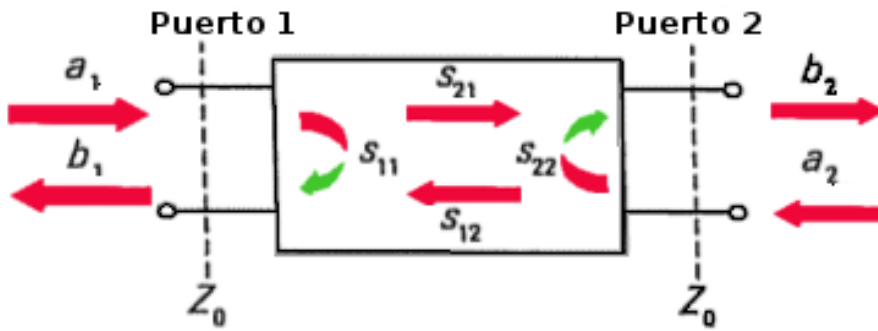


Figura 1.4: Ejemplo de reflexion dispositivo de 2 puertos.

Las cantidades de onda tienen unidades de \sqrt{W} . La verdadera potencia incidente en el DUT es $|a|^2$ y la verdadera potencia reflejada es $|b|^2$. El coeficiente de reflexión representa el cociente entre la onda incidente y la onda reflejada $\Gamma = \frac{a}{b}$. Este cociente suele ser un número complejo y puede ser calculado con la impedancia compleja z . Con una impedancia de referencia $Z_0 = 50\Omega$, la normalizada $Z = \frac{z}{Z_0}$ se define y usa para obtener el coeficiente de reflexión $\Gamma = \frac{z-1}{z+1}$.

En un dispositivo de 2 puertos, además de la reflexión de los 2 puertos existe la posibilidad de transmisión en ambas direcciones (Figura 1.4) [1]. En comparación con el coeficiente de reflexión los parámetros $S(S_{11}, S_{12}, S_{21}, S_{22})$ son definidos como los cocientes de las distintas cantidades de onda. Para la medida adelante, la terminación libre de reflexión $\Gamma = 0$ (MATCH) se usa en el puerto 2, esto significa que $a_2 = 0$ y el puerto 1 es estimulado por una onda incidente $a_1 \neq 0$ (Figura 1.5) [1].

Medimos el coeficiente de reflexión en la entrada S_{11} en el puerto 1 y el cociente de transmisión hacia adelante S_{21} entre los dos puertos (ecuaciones 1.1 y 1.2).

$$S_{11} = \frac{b_1}{a_1} \Big|_{a_2=0} \quad (1.1)$$

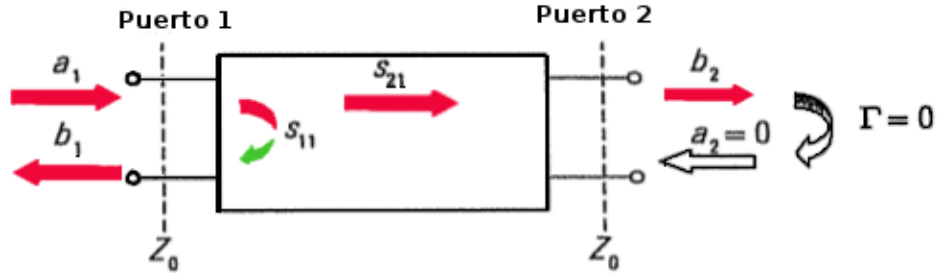


Figura 1.5: Ejemplo de medida adelante.

$$S_{21} = \frac{b_2}{a_1} \Big|_{a_2=0} \quad (1.2)$$

Para la medida inversa (Figura 1.6) [1], una match $\Gamma = 0$ es usada en el puerto 1 ($a_1 = 0$). El puerto 2 es estimulado por la onda incidente $a_2 = 0$.

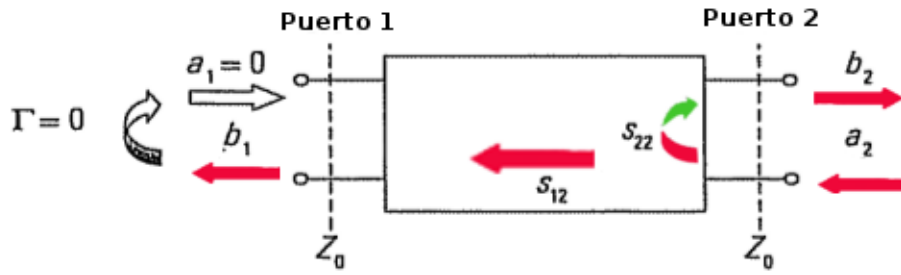


Figura 1.6: Ejemplo de medida inversa.

Bajo estas condiciones medimos el coeficiente de reflexión en la entrada S_{11} en el puerto 1 y el coeficiente de transmisión hacia adelante S_{21} entre el puerto (ecuaciones 1.3 y 1.4).

$$S_{12} = \frac{b_1}{a_2} \Big|_{a_1=0} \quad (1.3)$$

$$S_{22} = \frac{b_2}{a_2} \Big|_{a_1=0} \quad (1.4)$$

Normalmente ambas ondas de incidencia pueden no ser cero $a_1 \neq 0$ y $a_2 \neq 0$. Este caso se considera una superposición de las dos situaciones anteriores (ecuaciones 1.5 y 1.6).

$$b_1 = S_{11}a_1 + S_{12}a_2 \quad (1.5)$$

$$b_2 = S_{21}a_1 + S_{22}a_2 \quad (1.6)$$

Agrupando los parámetros S en una matriz y las cantidades de onda para obtener los vectores a y b (ecuaciones 1.7 y 1.8).

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (1.7)$$

$$b = Sa \quad (1.8)$$

Algunos componentes pueden ser representados mediante uno o dos puertos. A medida que la integración aumenta, los dispositivos de mas de dos puertos se estan haciendo cada vez más habituales, por eso se ha empezado a usar la terminologia de N-puertos. Una red de 3 puertos se caracteriza por las siguientes ecuaciones 1.9, 1.10 y 1.11.

$$b_1 = S_{11}a_1 + S_{12}a_2 + S_{13}a_3 \quad (1.9)$$

$$b_2 = S_{21}a_1 + S_{22}a_2 + S_{23}a_3 \quad (1.10)$$

$$b_3 = S_{31}a_1 + S_{32}a_2 + S_{33}a_3 \quad (1.11)$$

En una matriz de coeficientes con 3 o más puertos. Los elementos de la diagonal S_{11} , S_{22} y S_{33} corresponden al coeficiente de reflexión de cada puerto medido en el caso de final libre de reflexión en todos los demás puertos con $\Gamma = 0$. Esta caracterización se puede extender de forma similar para un numero mayor de puertos.

Capítulo 2

Estado del arte

2.1. Calibración

En este capítulo se explica la necesidad de una calibración en los sistemas de medidas de RF/microondas, y los distintos tipos de calibración. La mayor parte de la información se ha obtenido del libro *Fundamentals of Vector Network Analysis* [1], especializado en analizadores de red vectorial.

2.1.1. Tipos de errores

Existen dos tipos de errores que puede tener una medida con el analizador. Se clasifican en:

- Errores aleatorios de medidas: varían en el tiempo de forma aleatoria, son impredecibles. Este tipo de error ocurre principalmente por conectar y desconectar las conexiones repetidamente.
- Errores sistemáticos de medidas: son debidos a imperfecciones en el analizador y en la configuración de la medidas a tomar. Son invariables en el tiempo por lo que son predecibles.

Errores aleatorios de medidas

Como se ha dicho anteriormente los errores aleatorios de medidas son impredecibles con lo cual no se pueden eliminar de forma sistemática, pero si se intenta reducir el número de aparición de estos errores. Estos son algunos de los errores aleatorios:

- Derivación térmica: Se observa una variación de la fase debido a una derivación en temperatura, incluso en aparatos con una buena estabilidad térmica. Una vez que el analizador se ha calentado y llegado a una temperatura idónea en un entorno con una temperatura estable hará que haya pocas fluctuaciones debidas al cambio de temperatura.
- Repetitividad: Esta característica nos dice que tiene que existir correlación entre medidas sucesivas hechas en un corto periodo de tiempo bajo las mismas condiciones

Datos sistema	Datos brutos	Datos efectivos
<i>Reflexión</i>	≤ 2 dB	$\leq 0,04$ dB
<i>Directividad</i>	≥ 29 dB	≥ 46 dB
<i>Match origen</i>	≥ 22 dB	≥ 39 dB
<i>Transmision</i>	≤ 2 dB	$\leq 0,06$ dB
<i>Aislamiento</i>	≥ 130 dB	≥ 130 dB
<i>Match de carga</i>	≥ 22 dB	≥ 44 dB

Tabla 2.1: Estabilidad de la corrección.

(misma medida cuantitativa, misma configuración del instrumento, mismo procedimiento, mismo DUT...). Para mejorar las conexiones y la calidad del equipo a la hora de tomar las medidas:

- Los conectores deben de estar limpios. Nunca limpiarlos con agua o ácidos abrasivos. Solo se puede usar un algodón con alcohol isopropílico.
 - Apretar los tornillos usando la llave dinamométrica, durante el procedimiento de apretar solo el tornillo debe de ser apretado, no rotar el conector.
- Ruido: El ruido térmico envuelve los valores medidos con otro error impredecible.

Errores sistemáticos de medidas

Errores no lineales

Los efectos de compresión se dan cuando se opera en una frecuencia cercana al tope superior de potencia. Esto es debido a los mezcladores usados en el procesamiento de la señal RF, si el efecto de compresión ocurre en el mismo grado en la medida y en la señal de referencia luego es compensado a la hora de calcular los parámetros S .

Puesto que la señal-ruido desciende a bajos niveles de señal, el rango lineal no puede ser usado arbitrariamente en bajas amplitudes de señal. De acuerdo a la precisión de las medidas se debe seleccionar un nivel en el que no haya compresión por ser demasiado elevado y no haya un gran nivel señal-ruido. Trabajando con dispositivos de alta ganancia los -10 dBm suele ser lo ideal.

Errores lineales

Cualquier analizador de red puede ser mostrado como un analizador ideal y una red de errores. Los parámetros de esta red de errores son llamados términos de error. La corrección sistemática de errores hace uso de recursos matemáticos para compensar la el error de la red. Las medidas tras su respectiva corrección es la medida efectiva del sistema. Esta medida depende de la precisión con la que hayan sido calculados los términos de error. La estabilidad de la corrección está limitado por los errores aleatorios.

2.1.2. Calibración

El procedimiento que determina los términos de error se llama calibración. Un proceso de calibración consiste en realizar una serie de medidas con distintos estándares. Tiene que haber uno o dos puertos conocidos (en estos puertos se sabe el valor que tiene que salir de forma teórica). Como es imposible construir estándares de calibración ideales (por ejemplo un SHORT donde $\Gamma = -1$), las desviaciones son proporcionadas al analizador en modo de datos característicos. Una vez finalizado el procedimiento de calibración, el analizador calcula los términos de error e_{ik} . Para hacer los cálculos, el analizador utiliza los valores medidos durante la calibración y los datos conocidos de los estándares de calibración. Usando los términos de error, es posible corregir los valores brutos conseguidos por el analizador y calcular los parámetros-S para la medida del dispositivo a caracterizar.

La interfaz física entre la red de errores y el dispositivo a caracterizar es conocido como el plano de referencia (Figura 2.1) [1]. Las medidas corregidas de los parámetros-S se refieren a este plano como el punto de inicio de la medición. Cuando se usan estándares de calibración coaxial, el plano de referencia se pone en el plano más externo de los conductores.

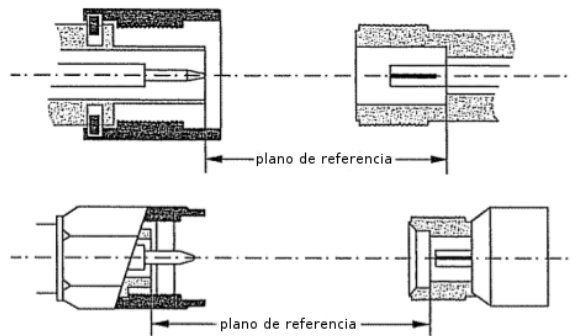


Figura 2.1: Ejemplos de planos de referencia.

2.1.3. Estándares de calibración

El procedimiento de calibración necesita de dispositivos especiales de uno o dos puertos que sean lo mas parecidos al ideal. Debido a los procesos de producción, sus propiedades divergen de los estándares ideales (OPEN ideal $\Gamma = 1$, SHORT ideal $\Gamma = -1$). Por esta razón, las propiedades de los estándares están reunidas en los datos característicos. Los procedimientos para medir estos valores son conocidos como caracterización. Los datos característicos son normalmente incluidos en el juego de calibración. Es importante tener los datos característicos acreditados, esto se debe de hacer en un intervalo regular de tiempo.

Para hacer el proceso de calibración lo más rápido posible, algunos fabricantes de analizadores de red ofrecen un equipo de calibración automático. Para el usuario, esto elimina la posibilidad de error a la hora de elegir el estándar adecuado y el proceso a seguir. La

automatización es ventajoso especialmente en áreas de producción. Como la calibración automática tiene los datos característicos almacenados no es necesario introducir ningún dato al analizador, lo cual también elimina otra posible situación de error.

Estándares coaxial

SHORT

En coaxial es fácil hacer un corto con características cercanas a las ideales (reflexión total $|\Gamma| = 1$). El coeficiente de reflexión del estándar depende sólo de la longitud de desplazamiento l , longitud entre el plano de referencia y el corto (Figura 2.2) [1].

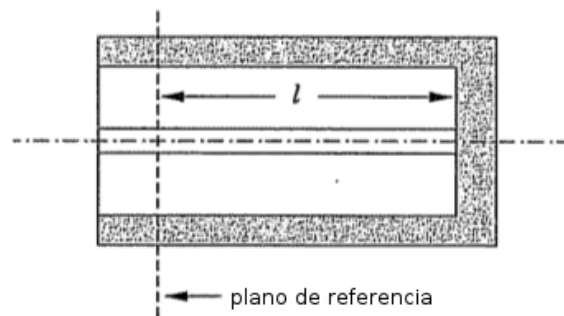


Figura 2.2: Estándar SHORT.

OPEN

En un estándar abierto al final de la línea se ponen dos capacitancias para que no interfiera radiación del exterior (Figura 2.3) [1].

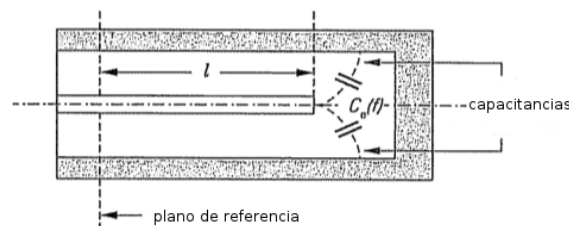


Figura 2.3: Estándar OPEN.

MATCH

Un estándar MATCH es una placa de precisión con una impedancia que corresponde a la impedancia del sistema (Figura 2.4) [1], con pequeños agujeros hechos a láser es posible optimizar el valor de la impedancia al valor requerido.

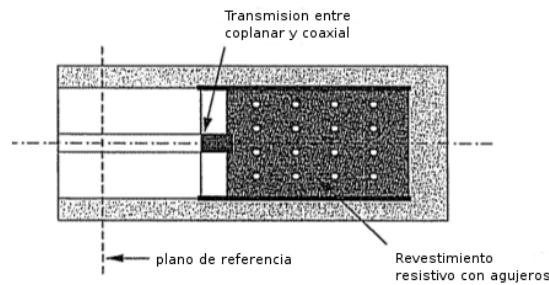


Figura 2.4: Estándar MATCH.

THROUGH

Estándar de dos puertos que permite conexión directa de dos puertos con bajas pérdidas (Figura 2.5) [1]. Si estamos usando conectores del mismo tipo pero de distinto género, se puede conectar directamente los dos puertos para hacer una conexión. Por definición este tipo de conexión tiene una longitud de inserción eléctrica de 0 mm. El caso ideal es representado por una línea de aire sin ningún soporte con el conductor interno. Se utiliza en modelos de 7 términos sobre todo.

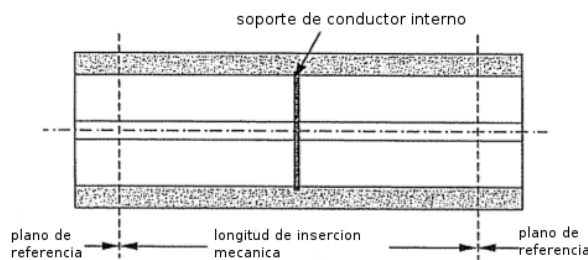


Figura 2.5: Estándar THROUGH.

Reflexión

Estándar de reflexión, estándar de un solo puerto con un coeficiente de reflexión $\Gamma > 0$. El valor de reflexión exacto no es necesario para la técnica TRL. De todas formas debe ser idéntico en ambos puertos. El estándar de reflexión es también usado en las técnicas de autocalibración. En estas técnicas las características conocidas del estándar se usan para determinar las otras propiedades del estándar. La fase del estándar de reflexión debe ser $\pm 90^\circ$. A bajas frecuencias se comporta de forma mas capacitiva y mas inductiva.

Línea

Estándar de dos puertos. En coaxiales es implementado como una línea de aire. La cantidad crítica es la impedancia de la línea. La longitud eléctrica de la línea debe ser distinta de la longitud eléctrica del estándar THROUGH. La diferencia entre las dos longitudes no

debe ser igual a la integral de la mitad de la longitud de onda porque se produciría una singularidad.

Red simetrica

Estándar de dos puertos con simétricos parámetros $S_{11} = S_{22}$ para los dos puertos. Los coeficientes de reflexión pueden tener cualquier valor excepto $S_{11} = S_{22} = 0$. Es necesario saber si los coeficientes de reflexión son más parecidos a un OPEN o a un SHORT. S_{12} y S_{21} son irrelevantes y pueden tener valores de 0 y 1.

Otros estándares

Existen mas estándares de calibración coaxial como el THROUGH desconocido o el MATCH deslizante pero no los trataremos en este documento debido a su poco y específico uso.

Estándares guiaondas

Para calibrar las medidas con guiaondas, se usan principalmente los mismos estándares que se usan para coaxial. Guiaondas pueden tener distintos modos de propagación, la frecuencia de estimulo puede ser mayor que la frecuencia critica, conforme aumenta la frecuencia del estimulo el numero de modos de propagación aumenta.

SHORT

En un sistema guiaondas un SHORT puede ser creado poniendo una placa conductora con una brida al final de puerto (Figura 2.6) [1]. El SHORT tiene una longitud de compensación $l = 0$, la incertidumbre para determinar l desaparece.

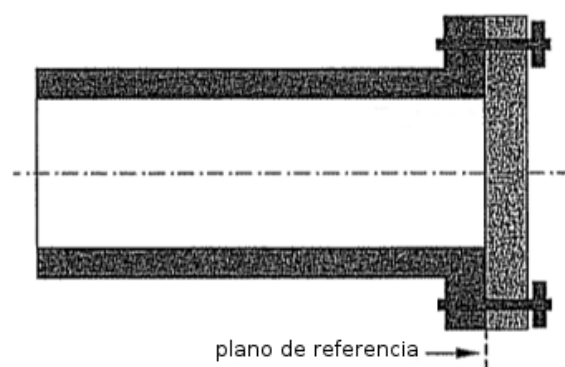


Figura 2.6: Estándar SHORT.

SHORT compensado

Un guiaondas en abierto no se puede usar como un estándar OPEN. Debido a los efectos de la radiación en el final del guiaondas, solo una pequeña porción de la energía es reflejada.

Un guiaondas abierto al final se comporta mas parecido a un mal MATCH y no se puede usar como un estándar OPEN. Por eso se usa el SHORT compensado el cual tiene una longitud de compensación elegida para que el SHORT se comporte como un OPEN (Figura 2.7) [1].

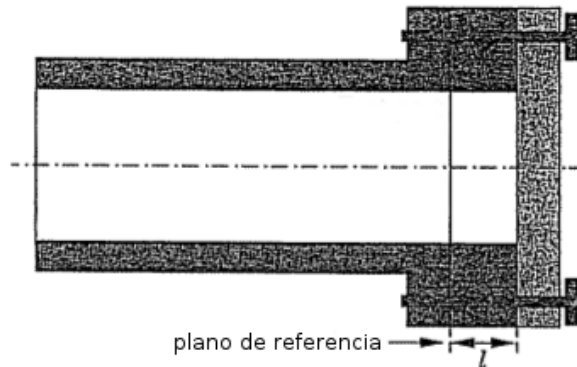


Figura 2.7: Estándar THROUGH compensado.

MATCH

Una estructura en forma de cono o de pirámide hecho de ferrita es puesta al final del estándar cerrándola al final (Figura 2.8) [1]. A las frecuencias típicas $f > 4$ GHz, el material actúa como un atenuador absorbiendo la mayoría de la energía electromagnética, ayudando a tener un retorno de perdidas de $a_T = 30$ dB o mejor.

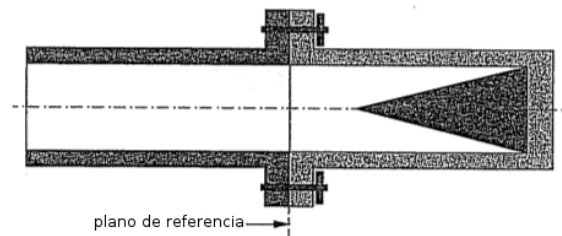


Figura 2.8: Estándar MATCH.

THROUGH

El THROUGH consiste en otro trozo de guiaondas o si las condiciones mecánicas lo permiten, una conexión directa entre los puertos de prueba. Un guiaondas THROUGH esta caracterizado igual que guiaondas en coaxial.

Adaptadores entre coaxial y guiaondas

La mayoría de los analizadores de redes tienen conectores coaxiales, necesitan adaptadores para transmitir desde conectores coaxiales a sistemas de guiaondas y viceversa. El acoplamiento inductivo o capacitivo o una combinación de los dos es usado para acoplar la

señal a la entrada y salida del guiaondas. Hay una gran variedad de adaptadores disponibles en el mercado.

Estándares calibración microstrip

Para medir circuitos impresos en tecnología microstrip, se requiere un juego de estándares de calibración como aquellos representados (Figura 2.9) [1]. En general estos estándares están hechos de la misma tecnología que el sustrato de medición, idéntico espesor etc. Para todos los estándares, se requiere una longitud mínima para que los modos superiores que surgen por el paso del coaxial a la placa puedan desaparecer.

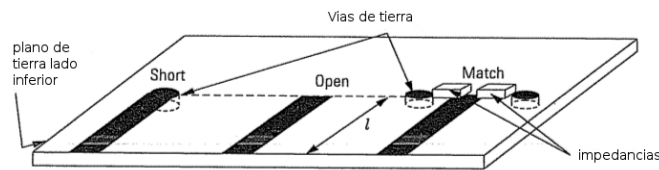


Figura 2.9: Estándares de calibración microstrip (corto circuito, circuito abierto y adaptación).

La transición entre los estándares de calibración y el cable coaxial conectado al puerto del analizador de red se realiza soldando un adaptador. Para solucionar los problemas de conexión entre el analizador de red y los estándares y los DUTs microstrips, se ha optado por utilizar un sistema comercial que realiza la transición coaxial a microstrip.

Sistema de medidas microstrip

Es un sistema de medidas de dos puertos que permite llevar a cabo medidas de parámetros S de líneas en tecnología microstrip de diferentes dimensiones (Figura 2.10). Cada puerto posee un adaptador coaxial cuyo conductor central hace de punta. Para conseguir una conexión óptima y medidas reproducibles, las puntas realizan una misma presión en las líneas microstrips mediante mordazas. Las restricciones sobre las dimensiones de la línea microstrip son:

- Anchura de la tira conductora $0,1 \text{ mm} \leq W \leq 1 \text{ mm}$.
- Espesor del sustrato $0,12 \text{ mm} \leq h \leq 1,9 \text{ mm}$.
- Longitud de la línea microstrip $5 \text{ mm} \leq d \leq 50 \text{ mm}$.

2.2. Modelos de error y técnicas de calibración

Durante estas últimas décadas, se han desarrollado un gran número de técnicas de calibración de analizadores de redes vectoriales. En este apartado, presentamos las principales técnicas.



Figura 2.10: Sistema de medidas microstrip.

2.2.1. Modelo de 3 términos de error

Todos los errores de medida sistemáticos son modelados mediante un método de error de dos puertos (Figura 2.11). Esto es posible porque se combina el generador y el receptor de referencia en una onda ideal en el origen ($b_1 = 0$). Junto con el receptor ideal ($a_3 = 0$), obtenemos un dispositivo de un puerto que puede ser caracterizado como un analizador ideal.

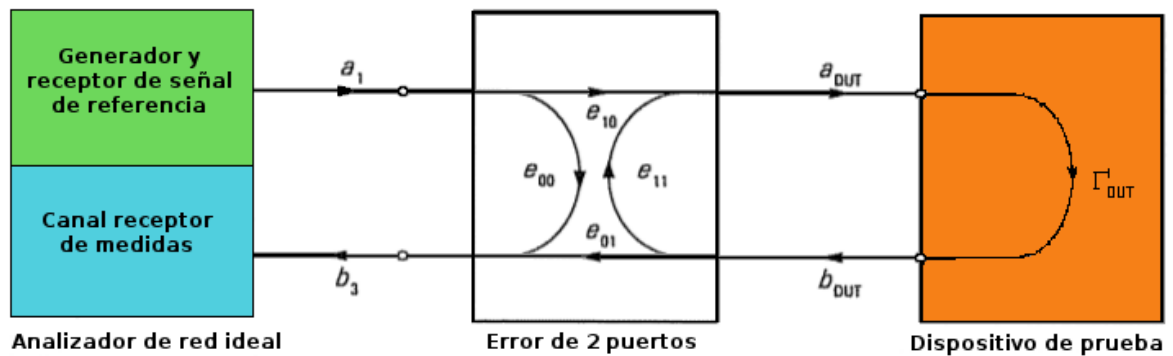


Figura 2.11: Metodo de error de 2 puertos.

Para explicar los modelos de error se utilizará un analizador de 2 puertos. En la técnica OSM (OPEN-SHORT-MATCH) los distintos estándares son medidos para determinar los parámetros del modelo de error. Para simplificar el cálculo asumimos un estándar MATCH ideal. Con este estándar la reflexión es 0, $\Gamma = 0$. Los estándares OPEN y SHORT son caracterizados por su coeficiente de reflexión Γ_O y Γ_S . La matriz de error de dos puertos es

caracterizada por las dos siguientes ecuaciones (2.1 y 2.2):

$$\begin{bmatrix} a_{DUT} \\ b_3 \end{bmatrix} = S_G \begin{bmatrix} b_{DUT} \\ a_1 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

$$S_G = \begin{bmatrix} e_{11} & e_{10} \\ e_{01} & e_{00} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

La configuración consiste en el dispositivo a caracterizar y la matriz de errores de dos puertos pueden ser combinados en un puerto con un coeficiente de reflexión Γ_E . Nos referiremos a este puerto como carga equivalente (Figura 2.12).

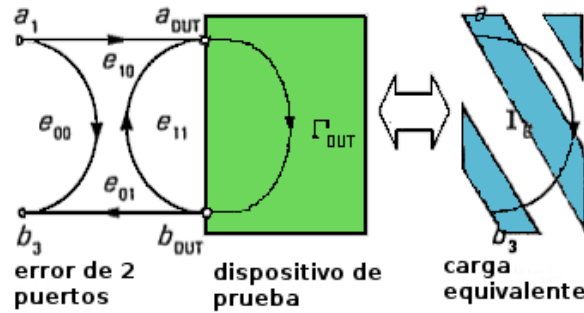


Figura 2.12: Carga equivalente 2 puertos.

El coeficiente de reflexión Γ_E de la carga equivalente puede ser calculada desde la matriz S_G y el coeficiente de reflexión del dispositivo a caracterizar Γ_{DUT} (2.3):

$$\Gamma_E = \frac{b_3}{a_1} = e_{00} + \frac{e_{01}e_{10}\Gamma_{DUT}}{1 - e_{11}\Gamma_{DUT}} \quad (2.3)$$

El valor medido M determinado por el analizador ideal de las cantidades de onda a_1 y b_3 es igual al coeficiente de reflexión Γ_E de la carga equivalente. El parametro e_{01} nunca puede tener un valor 0 en un analizador de red. De acuerdo con esto podemos asumir que $e_{01} = 1$ y se incorpora su influencia el parámetro e_{10} (2.4):

$$M = e_{00} \frac{e_{10}\Gamma_{DUT}}{1 - e_{11}\Gamma_{DUT}} \quad (2.4)$$

Si medimos con los estándares OPEN ($\Gamma_{DUT} = \Gamma_O$), SHORT ($\Gamma_{DUT} = \Gamma_S$) y MATCH ($\Gamma_{DUT} = \Gamma_M = 0$) obtenemos los valores $M = M_O$, $M = M_S$ y $M = M_M$ combinándolos con los datos característicos obtenemos las ecuaciones (2.5) a (2.7).

$$M_O = e_{00} + \frac{e_{10}\Gamma_O}{1 - e_{11}\Gamma_O} \quad (2.5)$$

$$M_S = e_{00} + \frac{e_{10}\Gamma_S}{1 - e_{11}\Gamma_S} \quad (2.6)$$

$$M_M = e_{00} \quad (2.7)$$

Simplificando salen las ecuaciones (2.8) , (2.9) y (2.10).

$$e_{00} = M_M \quad (2.8)$$

$$e_{10} = \frac{(\Gamma_O - \Gamma_S)(M_O - M_M)(M_S - M_M)}{\Gamma_O\Gamma_S(M_O - M_S)} \quad (2.9)$$

$$e_{11} = \frac{\Gamma_S(M_O - M_M) - \Gamma_O(M_S - M_M)}{\Gamma_O\Gamma_S(M_O - M_S)} \quad (2.10)$$

Los términos de error (e_{00}, e_{01}, e_{11}) son también referidos como los datos brutos del sistema en un analizador monopuerto (Tabla 2.2).

Datos brutos		términos de error
<i>Reflexión</i>		e_{10}
<i>Directividad</i>		e_{00}
<i>Prueba</i>	<i>puerto</i>	e_{11}
<i>match</i>		

Tabla 2.2: Términos de error como datos en sistema monopuerto.

Los términos de error (e_{00}, e_{01}, e_{11}) determinados de esta manera son utilizados para conseguir el sistema de corrección de errores para las medidas de un puerto. Tras resolver las anteriores formulas y conseguir los términos de error introducimos estos términos y conseguimos el valor correcto para la reflexión del dispositivo Γ_{DUT} ya corregido(2.11):

$$\Gamma_{DUT} = \frac{M_{DUT} - e_{00}}{e_{10} + e_{11}(M_{DUT} - e_{00})} \quad (2.11)$$

Todos los cálculos anteriores son para el caso ideal, sin tener en cuenta la longitud eléctrica de los estándares. Para tener en cuenta la longitud eléctrica de cada estándar, hay que añadir su valor (2.13) y (2.13):

$$\Gamma_O = e^{-j\beta L} \quad (2.12)$$

$$\Gamma_S = -e^{-j\beta L} \quad (2.13)$$

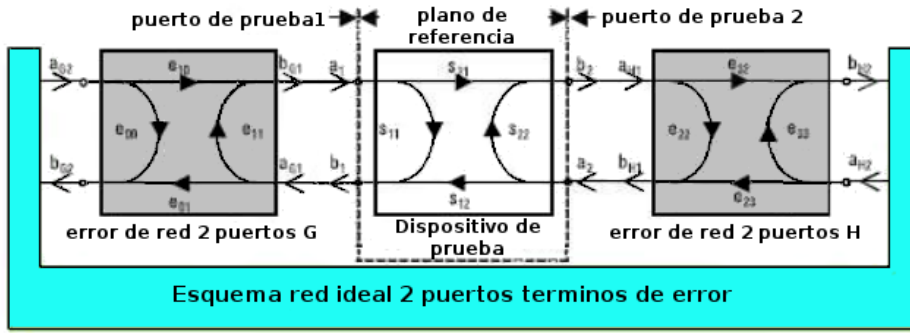


Figura 2.13: Modelo de error de 7 términos.

2.2.2. Modelo de error de 7 términos

Los modelos de error de 7 términos están basados en un analizador de red de 2 puertos con 4 receptores. El modelo de error de 7 términos incluye 2 puertos de error G y H (Figura 2.13). Los puertos de prueba van funcionando de forma alternada. El generador del analizador está conectado al puerto de prueba activo mediante un interruptor y se produce un estado en el que $a_{G2} \neq 0$ o $a_{H2} \neq 0$. Como hay 4 receptores las cantidades de onda a_{G2} y a_{G2} se miden sin saber cual de los dos puertos es el que está funcionando en ese momento. De esta manera las propiedades no ideales pueden ser monitorizadas durante todas las medidas y corregidas. La red de errores de dos puertos G y H son caracterizadas por los siguientes ecuaciones (2.14) y (2.15).

$$\begin{bmatrix} b_{G1} \\ b_{G2} \end{bmatrix} = S_G \begin{bmatrix} a_{G1} \\ a_{G2} \end{bmatrix} \text{ donde } S_G = \begin{bmatrix} e_{11} & e_{10} \\ e_{01} & e_{00} \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

$$\begin{bmatrix} b_{H1} \\ b_{H2} \end{bmatrix} = S_H \begin{bmatrix} a_{H1} \\ a_{H2} \end{bmatrix} \text{ donde } S_H = \begin{bmatrix} e_{22} & e_{23} \\ e_{32} & e_{33} \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

De los 8 valores de términos e , los términos e_{10} , e_{32} , e_{23} y e_{01} nunca pueden tener un valor 0. Por lo que se puede establecer cualquier valor arbitrario distinto de 0. Los valores absolutos cambian pero la cantidad de onda no se ve afectada. Si asumimos $e_{32} = 1$, esto hace que tenga 7 términos de error independientes (lo que da nombre al modelo). Para las medidas hacia adelante y las reversas se usa el mismo modelo de error. La Tabla 2.3 se usa para asignar términos de error para los valores en bruto.

El parámetro de reflexión e_{11} o e_{22} que es asignado a cada puerto de prueba no depende de que puerto es activo o pasivo. Además el MATCH de origen coincide con el MATCH de carga medido en sentido contrario. Durante la calibración, uno y dos puertos estándar son medidos. Si medimos la reflexión estándar en el puerto 1, el valor medido $M = \frac{b_{G2}}{a_{G2}}$ corresponde al coeficiente de reflexión de entrada equivalente al error del puerto G y al estándar de reflexión

Datos en bruto	Medida hacia adelante	Medida inversa
<i>Directividad</i>	e_{00}	e_{33}
<i>Reflexión</i>	$e_{10}e_{01}$	$e_{23}e_{32}$
<i>Match origen</i>	e_{11}	e_{22}
<i>Transmision</i>	$e_{10}e_{32}$	$e_{01}e_{23}$
<i>Aislamiento</i>	e_{22}	e_{11}

Tabla 2.3: Valores en bruto y términos de error modelo de 7 terminos.

Γ_{std} (2.16 y 2.17).

$$\frac{b_{G2}}{a_{G2}} = e_{00} + \frac{e_{01}e_{10}\Gamma_{std}}{1 - e_{11}\Gamma_{std}} \quad (2.16)$$

$$\frac{b_{H2}}{a_{H2}} = e_{33} + \frac{e_{23}e_{32}\Gamma_{std}}{1 - e_{22}\Gamma_{std}} \quad (2.17)$$

Midiendo con un estándar en ambos puertos se obtienen 2 ecuaciones independientes para los 7 términos e desconocidos. Para caracterizar la medida del estándar de dos puertos, convertimos las matrices S_G y S_H en las correspondientes matrices de transferencia T_G y T_H . Además, suponemos que el estándar de dos puertos se caracteriza por su matriz de transferencia T_{STD} . Poniendo en cascada los dos puertos de error G, dos puertos estándar y dos puertos de error H, se consigue la siguiente ecuación (2.18):

$$\begin{bmatrix} b_{G2} \\ a_{G2} \end{bmatrix} = T_{Tot} \begin{bmatrix} a_{H2} \\ b_{H2} \end{bmatrix} \text{ donde } T_{Tot} = T_G T_{Std} T_H \quad (2.18)$$

y para la medida inversa (2.19):

$$\begin{bmatrix} b_{H2} \\ a_{H2} \end{bmatrix} = T_{Tot,rev} \begin{bmatrix} b_{G2} \\ a_{G2} \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

Para un estándar de dos puertos, se adquieren 4 ecuaciones para los términos e con las ecuaciones (2.18) y (2.19). En general el proceso de calibración debe producir 7 ecuaciones para sacar los 7 términos. Si todos los estándares son totalmente conocidos, la calibración dará 8 ecuaciones con lo que el proceso está sobredeterminado.

2.2.3. Resumen distintos modelos de 7 términos de error

En este apartado, resumimos brevemente las diferencias que existen entre 5 modelos de 7 términos de error. En la tabla (2.4) podemos ver cuantas ecuaciones salen en cada modelo de términos de error.

Estandares	TOM	TRM	TRL	TNA	UOSM
<i>Estándar de un puerto</i>					
<i>Open(O)</i>	2	-	-	-	2
<i>Short(S)</i>	-	-	-	-	2
<i>Match(M)</i>	2	2	-	-	2
<i>Reflexión(R)</i>	-	1	1	-	-
<i>Estándar de dos puertos</i>					
<i>Through(T)</i>	4	4	4	4	-
<i>Linea(L)</i>	-	-	2	-	-
<i>Red</i>	-	-	-	1	-
<i>Atenuador</i>	-	-	-	2	-
<i>Through desconocido</i>	-	-	-	-	1
<i>Numero de ecuaciones</i>	8	7	7	7	7

Tabla 2.4: Resumen de los distintos modelos de 7 términos de error.

TOM

La técnica TOM utiliza estándares totalmente caracterizados. Esta técnica genera 4 ecuaciones que son suplementarias por 4 ecuaciones adicionales para los estándares THROUGH. A pesar de que la técnica es sobredeterminada, permite una comprobación implícita. La conexión incorrecta o defectuosa de alguno de los estándares puede ser detectada inmediatamente después de terminar la calibración.

TRM

La técnica TRM es similar a la técnica TOM. Un estándar de reflexión sustituye el estándar OPEN de la TOM. El mismo estándar de reflexión puede ser usado para para todos los puertos de prueba.

TRL

La técnica TRL utiliza la impedancia característica de una línea de transmisión como impedancia de referencia. Esta línea reemplaza al estándar MATCH.

TNA

En la técnica TNA, el estándar de reflexión utilizado en las técnicas anteriores es reemplazado aquí por una red de dos puertos conocido como una red simétrica. En lugar del estándar de línea, un estándar atenuador es empleado con un muy buen resultado.

UOSM

En la técnica UOSM, una calibración completa monopuerto es realizada utilizando los estándares OPEN, SHORT y MATCH en cada uno de los puertos de prueba que estén envueltos en el proceso. Un estándar THROUGH desconocido reemplaza el estándar THROUGH em-

pleado en la técnica TOM.

2.2.4. Técnicas de calibración incompletas

Las técnicas de calibración anteriores están basados en modelos de error completos. Cuando se usa uno de los modelos de error anteriormente mencionados el analizador mide todos los parámetros S del dispositivo. No es posible reducir el tiempo a la hora de la calibración haciendo que no se calculen todos los parámetros S . Existen ciertos tipos de calibración incompleta usados para tomar solo algunas medidas.

Normalización

Si los requisitos de precisión son bajos, podemos usar una normalización. Se distinguen dos tipos de normalización:

- **Normalización en reflexión.** Normaliza uno de los parámetros en reflexión S_{11} y S_{22} . En este caso, la normalización se lleva a cabo midiendo un SHORT o un OPEN.
- **Normalización en transmisión.** Normaliza uno de los parámetros de transmisión S_{21} o S_{12} .

Capítulo 3

Programa

Nada mas arrancar el programa nos saldrá la primera pantalla del programa en la que tendremos dos opciones a elegir calibración o tomar medidas. Empezaremos por la calibración (Figura 3.1).

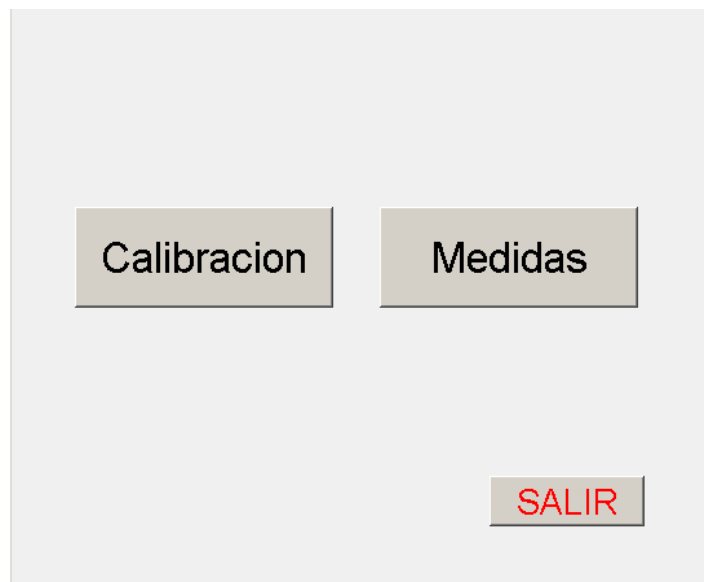


Figura 3.1: Primera pantalla del programa.

3.1. Calibración

La parte de calibración tiene dos opciones (Figura 3.2):

- La primera parte corresponde a una calibración OSM (OPEN, SHORT, MATCH) y a la toma de medidas. En primer lugar, el programa adquiere los datos de las medidas de los diferentes estándares y realiza un tratamiento matemático para obtener los términos de errores. En segundo lugar, el programa da acceso a la toma de medidas de dispositivos. El programa hará un tratamiento matemático de las medidas con los términos de errores obtenidos en primer lugar y proporcionará los resultados de las medidas corregidas.

- La segunda parte corresponde a una calibración incompleta mediante normalización de la transmisión. En esta parte se calibra calculando la longitud de los cables y midiendo con las antenas puestas. Esta parte del programa nos dirá la distancia entre las antenas debido al calculo de la PDP (perfil potencia-retardo).



Figura 3.2: Elección del tipo de calibración.

3.1.1. OSM

En la primera pantalla podemos ver las distintas opciones de configuración del VNA con las que se van a tomar las medidas (Figura 3.3). Hay que introducir los valores en cada cuadro de texto, teniendo en cuenta la magnitud dada en cada cuadro. Estos valores se usaran tanto en la calibración como en las medidas. Dependiendo del numero de puntos y del filtro IF que pongamos el analizador tardara mas o menos tiempo en calcular todas las medidas.

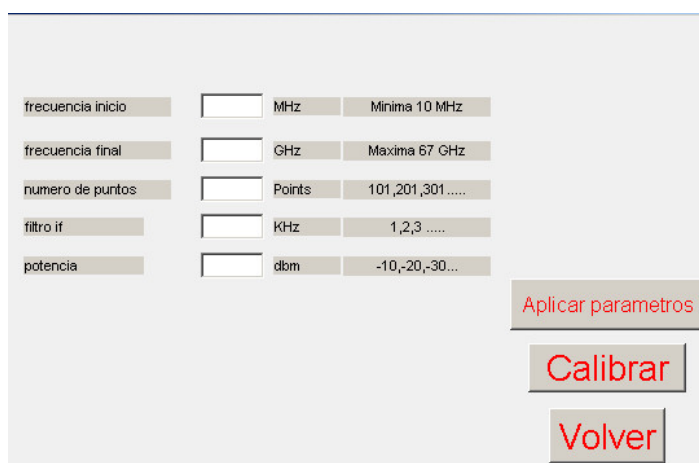
The image shows a software interface for entering parameters. It has a light gray background. On the left, there are five labels: 'frecuencia inicio', 'frecuencia final', 'numero de puntos', 'filtro if', and 'potencia'. To the right of each label is a text input field. Further right, the units and ranges are specified: 'MHz' with 'Minima 10 MHz', 'GHz' with 'Maxima 67 GHz', 'Points' with '101,201,301.....', 'KHz' with '1,2,3.....', and 'dbm' with '-10,-20,-30...'. On the right side of the interface, there are three buttons stacked vertically: 'Aplicar parametros' (with red text), 'Calibrar' (with red text), and 'Volver' (with red text).

Figura 3.3: Introducción de los parámetros.

En este código podemos ver como se hace para la inicialización de la comunicación entre el analizador y nuestro pc (codigo B.1), como se reinicia para que el analizador vuelva a las opciones de serie y luego mandamos los datos recogidos en los cuadros de texto con la configuración elegida.

OPEN

Una vez introducidos las anteriores opciones saldrán unas pantallas sucesivas indicando los distintos estándares de la calibración OSM. La primera pantalla y el primer estándar es el OPEN (Figura 3.4). En los cuadros de la pantalla, introducimos las características del estándar: longitud del delay y la permitividad efectiva.

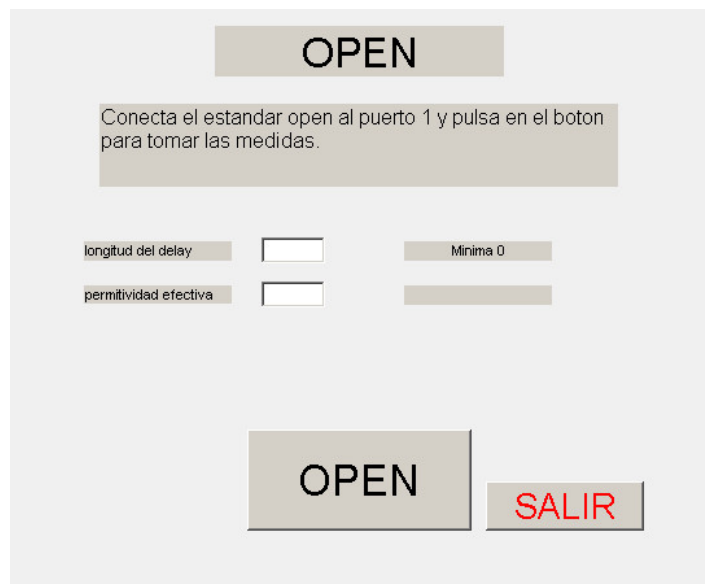


Figura 3.4: Pantalla de estándar OPEN.

En el código(B.2), se muestra el ejemplo de como se guardan los datos obtenidos en el disco duro del analizador, guardándose en la carpeta compartida con el pc para así poder cargar los datos desde matlab.

SHORT

Una vez finalizada la medida del OPEN, la la siguiente pantalla corresponde al estándar SHORT (Figura 3.5). Ponemos los datos característicos del estándar y le damos a OPEN. En este ejemplo no se muestra el código de matlab de la función encargada a este proceso, debido a que es el mismo que en el anterior estándar salvo el cambio del nombre del archivo en que se almacenaran las medidas.

SHORT

Conecta el estandar short al puerto 1 y pulsa en el boton para tomar las medidas.

longitud del delay Minima 0

permitividad efectiva

SHORT Salir

Figura 3.5: Pantalla de estándar SHORT.

MATCH

El ultimo estándar del que hay que tomar medidas para conseguir la calibración es la MATCH (Figura 3.6). Para este caso, no hay que introducir ningún dato característico. Una vez tomada la medida del estándar, se procederá a calcular los términos de error.

MATCH

Conecta el estandar match al puerto 1 y pulsa en el boton para tomar las medidas.

MATCH Salir

Figura 3.6: Pantalla de estándar MATCH.

Calculo de los términos de error

Tras haber tomado las medidas con los tres estándares, el programa calculará los términos de error utilizando las ecuaciones descritas en el apartado (2.2.1). En este primer código se

muestra como se cogen las medidas hechas por el analizador (codigo B.3) y como se guardan en matlab. Las medidas están en archivos .txt, siendo la primera columna la frecuencia en cada medida, la segunda columna la parte real y la tercera la parte imaginaria. En el código se juntan parte real e imaginaria para obtener un numero complejo. Se guardan dos matrices, una con las frecuencias y la otra sin frecuencias para luego a la hora de hacer los cálculos solo manejar la matriz sin frecuencias con el fin de ocupar menos memoria a la hora de hacer los calculos. Este proceso se realiza con las tres medidas. Despues de este código tendremos dos variables dentro de la interfaz gráfica (estas son las variables con las que se operara) y dos variables fuera para poder ser utilizadas para hacer cualquier calculo con matlab que el usuario quiera hacer para hacer comprobaciones o simplemente calcular otras cosas. Este mismo código se hace con los tres estándar cambiando los nombres de las distintas variables.

Una vez obtenidas las medidas con los tres estándares, se procede al calculo de los términos de error. El termino de error e_{00} es simplemente la medida realizada con el estándar MATCH. Para conseguir los otros dos términos de error, utilizamos las ecuaciones descritas en el apartado sec:ecuacionesosm). Tras aplicar las ecuaciones, tendremos los términos de error para el caso ideal, sin tener en cuenta los valores de la permitividad eléctrica y longitud de los estándares de calibración (codigo B.4), teniendo otra vez las variables con y sin las frecuencias en el general de matlab.

Una vez conseguidos los términos de error ideales calculados, se hacen los cálculos para el caso no ideal (codigo B.5) haciendo uso de los valores de permitividad eléctrica y longitud introducidos en cada estándar (codigo B.6). Al final se obtienen los valores con y sin frecuencias para cada termino de error con retardo.

Tomar medidas

Tras haber calculado los términos de error nos saldrá la siguiente pantalla (Figura 3.7), donde tendremos que elegir entre dos opciones: guardar la calibración para poder volver a utilizarla en otro momento o tomar medidas corregidas de un dispositivo a caracterizar.

- Opción guardar calibración: Permite guardar la calibración en un formato que entiende este propio programa y que servirá para cargar la calibración si queremos medir otra vez en otra futura sesión con las misma configuración (codigo B.7). Al guardar una calibración también se guarda el numero de puntos, el rango de frecuencias etc, estos valores no podrán cambiarse porque la calibración es especifica para esos valores.
- Opción tomar medidas: Indica que conectemos el dispositivo que queremos medir, tomará una medida y el programa facilitará los resultados de las medidas corregidas. Las medidas corregidas se obtienen teniendo en cuenta los términos de error obtenidos durante el proceso de calibración.

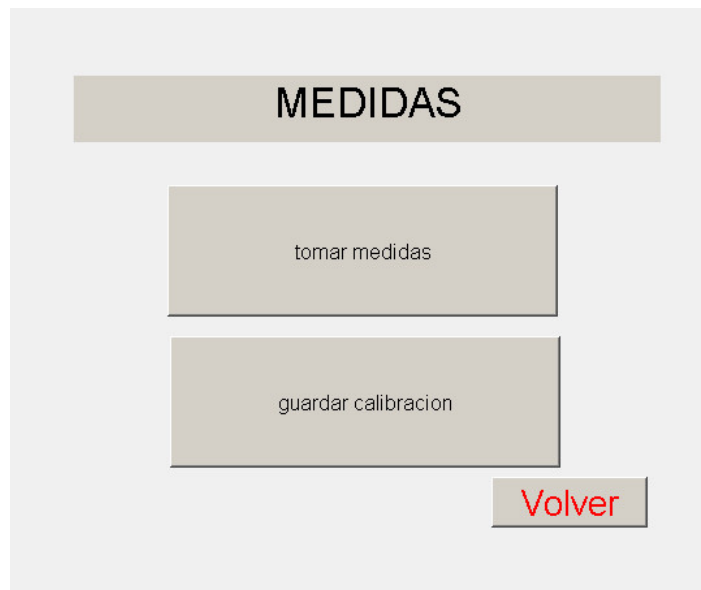


Figura 3.7: Medir o guardar calibración.

3.1.2. Calibracion mediante normalización THROUGH

En esta sección haremos una calibración incompleta mediante una normalización del tipo THROUGH, para ello tenemos que conectar los cables usados en la calibración del puerto 1 al puerto 2 del analizador de red. Esta medida sera tomada como la medida de referencia (codigo B.8). Este tipo de calibración solo vale para poder calcular el parámetro S_{21} . La normalización se hace mediante la división de la medida tomada del dispositivo de prueba y la medida de referencia (codigo B.9).

3.2. Medidas

En esta parte del programa se puede cargar una calibración, tomar medidas y mostrar las medidas en un gráfico (Figura 3.8). Como se puede ver hay 6 botones separados en dos columnas, la comuna de la izquierda corresponde a la calibración OSM y la de la derecha a la calibración THROUGH por normalización.

- **Tomar medidas:** En esta opción tomara medidas del dispositivo, para esta opción tiene que estar calibrado, para ello o bien se ha hecho una calibración y se ha procedido a volver atrás en el programa o bien se ha cargado la calibración con la siguiente opción.
- **Cargar calibración:** Con esta opción se carga una calibración que haya sido anteriormente guardada con el programa. Dependiendo de la calibración los parámetros a cargar serán distintos, en la calibración OSM se cargaran los parámetros de configuración y los términos de error (codigo B.10) , mientras que en la calibración THROUGH se cargaran los parámetros de configuración y la medida de referencia (codigo B.11). Esta opción es muy útil si se quieren probar distintos dispositivos en días distintos usando

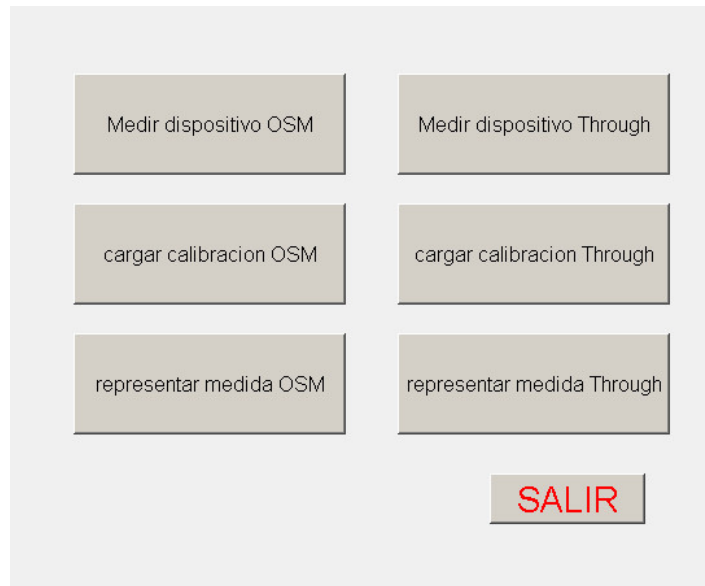


Figura 3.8: Pantalla de la seccion de medidas.

la misma configuración de cables entre los puertos del analizador y el dispositivo. La función cargaparametros manda los parámetros de configuración al analizador, las instrucciones a mandar al analizador para cargar los parámetros están guardadas en una matriz.

- Representar medidas: En esta opción representara las medidas tomadas anteriormente, y dependiendo del tipo de calibración muestra una representación distinta.
 - Representación de una medida tomada con calibración OSM (Figura 3.9), esta representación muestra 3 gráficas en la primera nos muestra la medida tras ser ya corregida con los términos de error, en la segunda gráfica nos muestra el retardo, y en la tercera nos muestra la longitud térmica media. Los valores que salen a la derecha son el retardo medio y la longitud media. Usando la siguiente ecuación con el resultado de la media de los retardos podemos sacar la longitud.

$$\frac{L \cdot \sqrt{\epsilon_{ref}}}{3 \cdot 10^8} \quad (3.1)$$

En el código (B.12) se muestra como se calcula una matriz con retardos entre dos medidas.

Una vez tenemos la matriz con los retardos podemos calcular la longitud. Esto se consigue de la siguiente forma (B.13).Una vez tenemos las matrices con los retardos y las longitudes simplemente matlab sacara la media para poder mostrar el resultado.

- Representación de una medida tomada con calibración incompleta mediante normalización (Figura 3.10), esta representación muestra 6 gráficas puestas en 2

columnas, la columna de la izquierda corresponde a los resultados sin calibrar mientras que la columna de la derecha corresponde a los resultados ya corregidos con la calibración. En cada columna se muestra en el primer gráfico la potencia recibida, en el segundo gráfico, la fase de la señal recibida y en el tercer gráfico el PDP nos dirá la distancia entre las dos antenas.

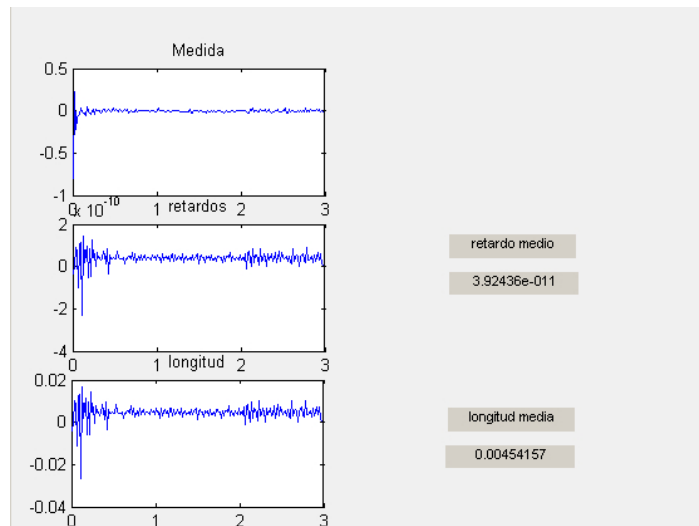


Figura 3.9: Ejemplo de una representación de una medida con calibración OSM.

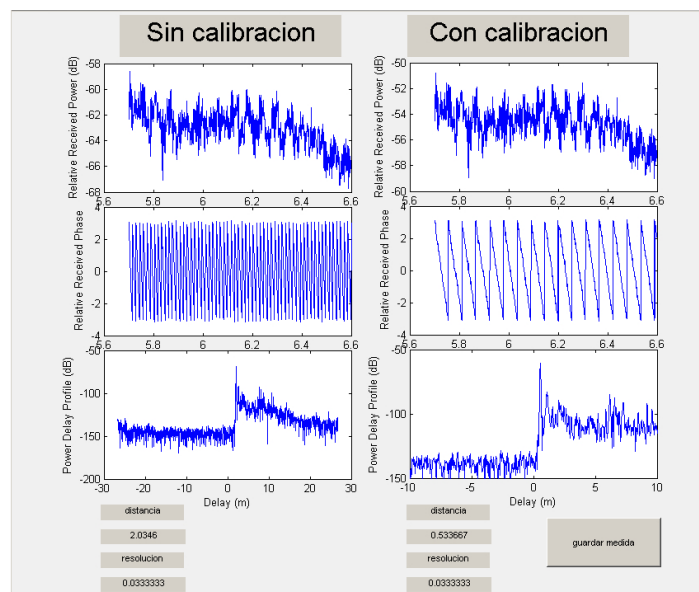


Figura 3.10: Ejemplo de una representación de una medida con calibración THROUGH.

Capítulo 4

Resultados

En este capítulo se muestran algunas pruebas realizadas en el laboratorio, con sus correspondientes resultados.

4.1. Calibración OSM

En este apartado se procederá a una calibración OSM. Dicha calibración se hará utilizando como soporte físico la tecnología microstrip (véase § 2.1.3). En concreto se empleará el kit de calibración de la marca arnitsu descrito en el Anexo (A.1.1) . Para llevar a cabo la calibración, se utilizará la técnica descrita en el apartado (2.2.1).

La configuración del analizador de red es la siguiente:

- Frecuencia de inicio: 10 MHz
- Frecuencia final: 3GHz
- Numero de puntos: 201 puntos
- Filtro IF: 10 Hz
- Potencia en origen: -10 dBm

4.1.1. Calibración

Medida del estándar OPEN

El primer paso en la calibración es medir el estándar OPEN, esta medida será tomada como M_{Open} . El estándar OPEN utilizado tiene las siguientes características:

- Longitud eléctrica: 4,7 mm
- Permitividad eléctrica: 6,72

Medida del estandar SHORT

Medimos el estandar SHORT que será empleado en el siguiente paso y la medida tomará la variable M_{Short} . Las características de este estándar son:

- Longitud eléctrica: 5 mm

- Permitividad eléctrica: 6,72

Medida del estandar Match

Medimos el estandar MATCH. Este es el estandar que se usa como referencia, el $M_{Match} = e00$.

4.1.2. Medida corregida del estándar OPEN

Se mide el estándar OPEN una vez realizada la calibración para así poder comprobar la diferencia entre los resultados obtenidos mediante el programa y los datos teóricos. Los resultados obtenidos con el programa muestran unos resultados para el retardo medio y para la longitud del doble del valor teórico calculado (Figura 4.1). Esto se debe a que la onda electromagnética recorre la longitud de ida y vuelta entre el plan de referencia y el OPEN, y por consiguiente, el doble de la longitud. Los valores teóricos calculados son el retardo (4.1) y la longitud (4.2). Se ha calculado el error relativo de la longitud mediante la ecuación (4.3).

$$t = \frac{L \cdot \sqrt{\epsilon_{ref}}}{c} \quad (4.1)$$

$$L = \frac{t \cdot c}{\sqrt{\epsilon_{ref}}} \quad (4.2)$$

$$\left| \frac{Valor_{real} - Valor_{medido}}{Valor_{real}} \right| \cdot 100 \quad (4.3)$$

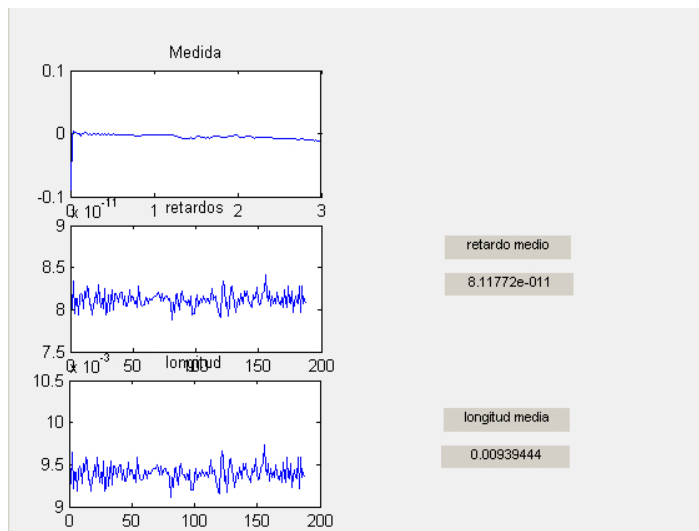


Figura 4.1: Graficas generadas por el programa para el estandar OPEN.

- Para el retardo teórico se obtiene un valor de $40,61 \cdot 10^{-12}\text{s}$ y el valor medido medio conseguido por el programa es $40,59 \cdot 10^{-12}\text{s}$.
- Para la longitud el programa ha calculado un valor de 4,69722 mm, siendo el valor real de las características del kit de calibración 4,7 mm.
- El error experimental para esta medida es de 0.06 %.

Para comprender mejor la utilidad de la calibración se puede ver la diferencia entre la medida en dB de la medida sin calibrar (Figura 4.2) y la medida una vez calibrado (Figura 4.3) de un estándar OPEN.

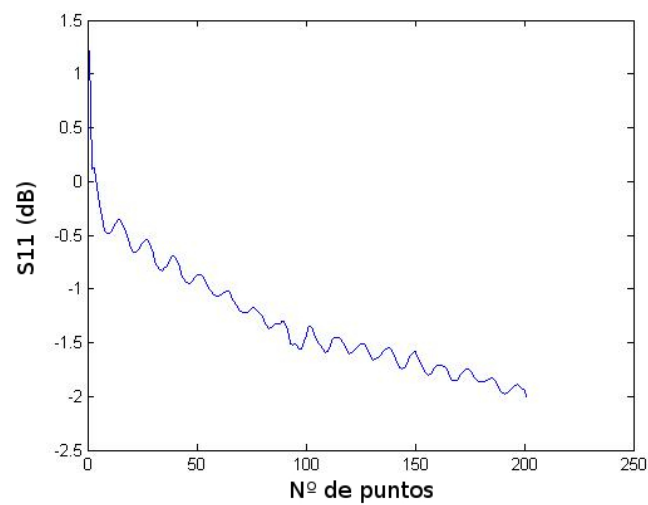


Figura 4.2: Medida del estándar OPEN sin calibrar.

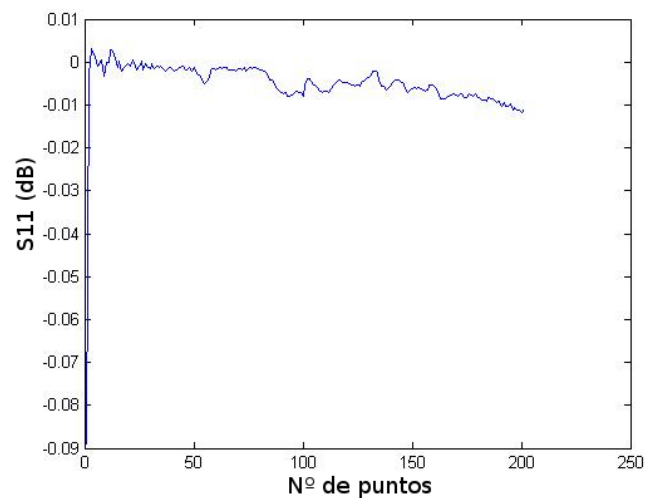


Figura 4.3: Medida corregida del estándar OPEN.

4.1.3. Medida corregida del estándar SHORT

Se mide el estándar SHORT, una vez realizada la calibración. Los resultados obtenidos con el programa (Figura 4.4) son comparados con los teoricos empleando (4.1), (4.2) y calculando el error relativo (4.3).

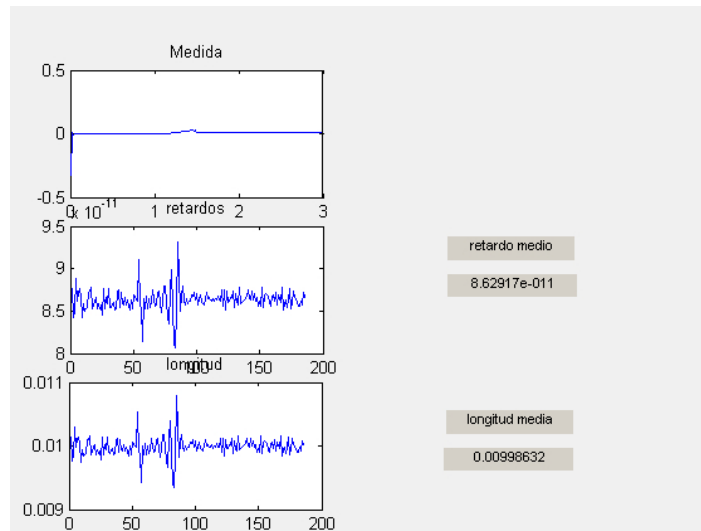


Figura 4.4: Graficas generadas por el programa para el estandar SHORT.

- Para el retardo teórico se obtiene un valor de $43,2 \cdot 10^{-12}\text{s}$ y el valor medido medio conseguido por el programa es $43,14585 \cdot 10^{-12}\text{s}$.
- Para la longitud el programa ha calculado un valor de 4,99316 mm, siendo el valor real de las características del kit de calibración 5 mm.
- El error experimental para esta medida es de 0.13 %.

Para comprender mejor la utilidad de la calibración se puede ver la diferencia entre la medida en dB de la medida sin calibrar (Figura 4.5) y la medida una vez calibrado (Figura 4.6).

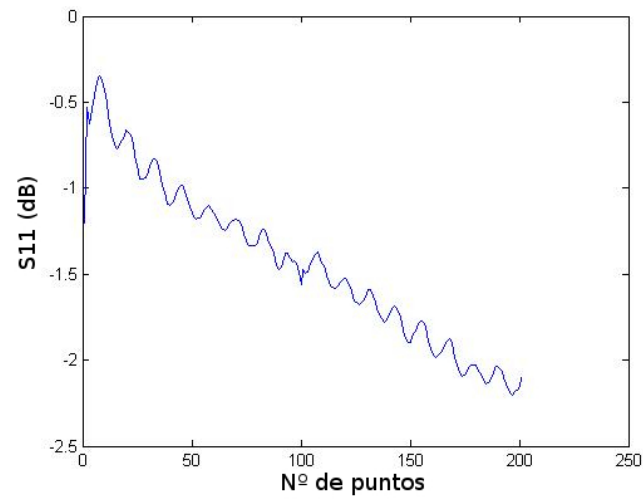


Figura 4.5: Medida del estándar SHORT sin calibrar.

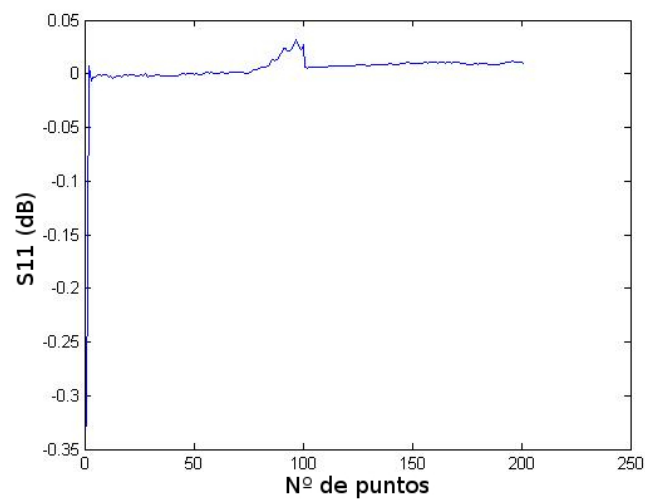


Figura 4.6: Medida corregida del estándar SHORT.

4.1.4. Medida corregida del estándar MATCH.

Las Figuras 4.7 y 4.8 representan respectivamente las medidas del estándar MATCH antes y después de la calibración. Se puede observar que se consigue un valor de coeficiente de reflexión del sistema inferior a -50 dB.

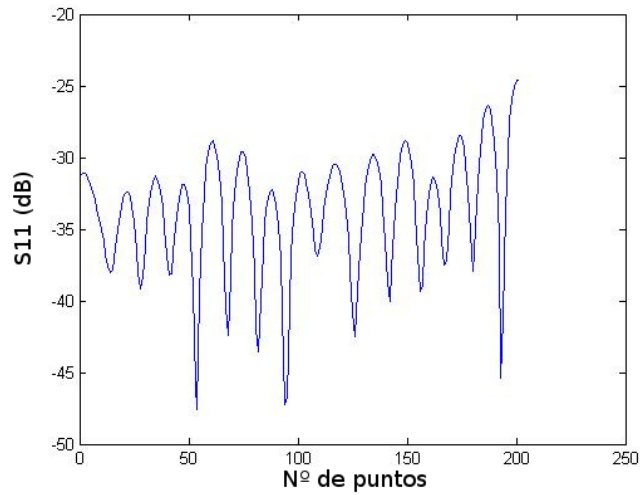


Figura 4.7: Medida del estándar MATCH sin calibrar.

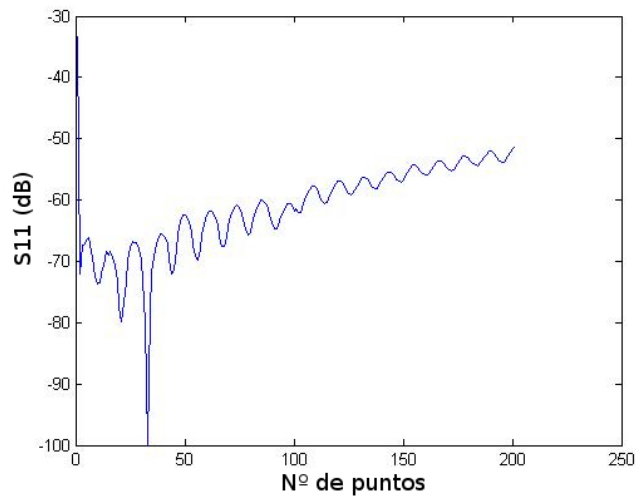


Figura 4.8: Medida corregida del estándar MATCH.

4.1.5. Medida línea de una longitud 10 mm

Se procede a medir una línea microstrip de longitud 10 mm. Comparamos los resultados obtenidos con el programa (Figura 4.9) y con aquellos obtenidos teóricamente con las ecuaciones (4.1) y (4.2), y finalmente, calculamos el error relativo mediante la ecuación (4.3).

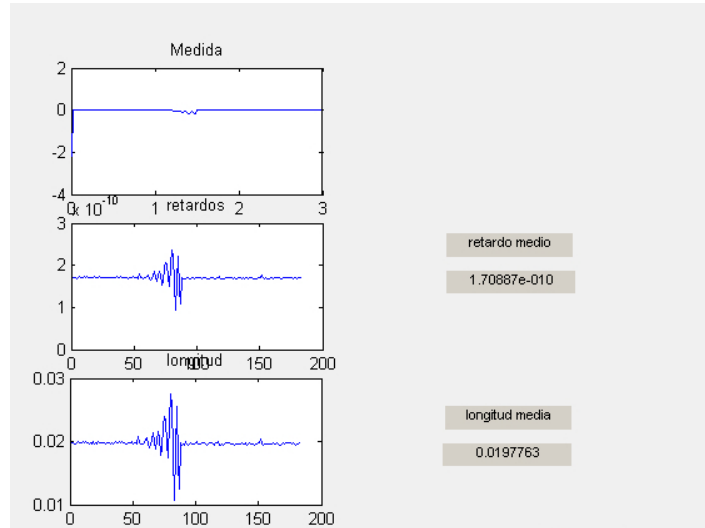


Figura 4.9: Graficas generadas por el programa para una linea de 10 mm de longitud.

- Para el retardo teórico se obtiene un valor de $86,41 \cdot 10^{-12}$ s y el valor medio medido conseguido por el programa es $85,4435 \cdot 10^{-12}$ s.
- Para la longitud el programa ha calculado un valor de 9,88815 mm, siendo el valor real de las características del kit de calibración 10 mm.
- El error relativo para esta medida es de 1,1185 %.

Las Figuras (4.10) y (4.11) representan las medidas en reflexión de una línea microstrip de 10 mm antes y después de la calibración.

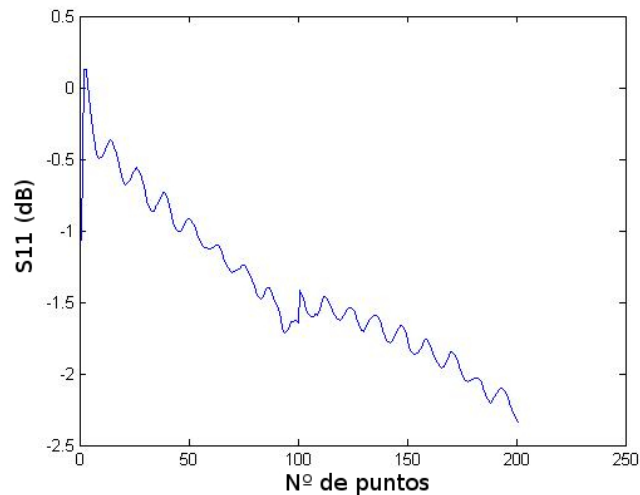


Figura 4.10: Medida de una linea de 10 mm sin calibrar.

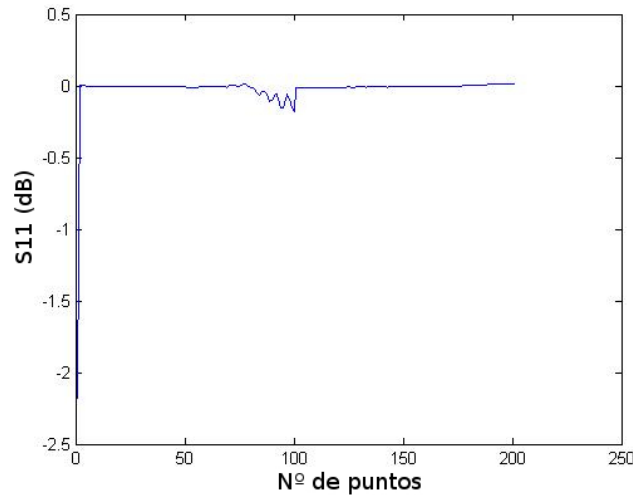


Figura 4.11: Medida corregida de una línea de 10 mm.

4.1.6. Medida línea de una longitud 11 mm

Se procede a medir una línea microstrip de longitud 11 mm. Comparamos los resultados obtenidos con el programa (Figura 4.12) y con aquellos obtenidos teóricamente con las ecuaciones (4.1) y (4.2), y finalmente, calculamos el error relativo mediante la ecuación (4.3).

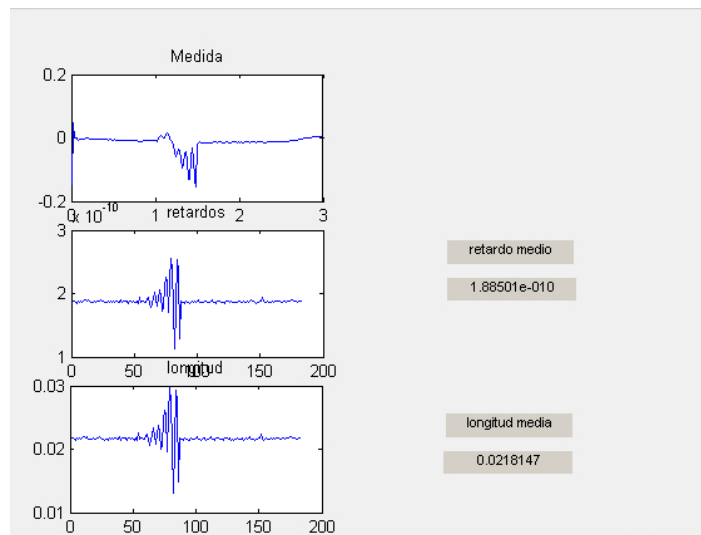


Figura 4.12: Graficas generadas por el programa una línea de 11 mm de longitud.

- Para el retardo teórico se obtiene un valor de $95,05 \cdot 10^{-12}$ s y el valor medio medido conseguido por el programa es $94,505 \cdot 10^{-12}$ s.
- Para la longitud el programa ha calculado un valor de 10,90735 mm, siendo el valor real de las características del kit de calibración 11 mm.

- El error relativo para esta medida es de 0,84 %.

Las Figuras 4.13 y 4.14 representan las medidas en reflexión de una línea microstrip de 11 mm antes y después de la calibración.

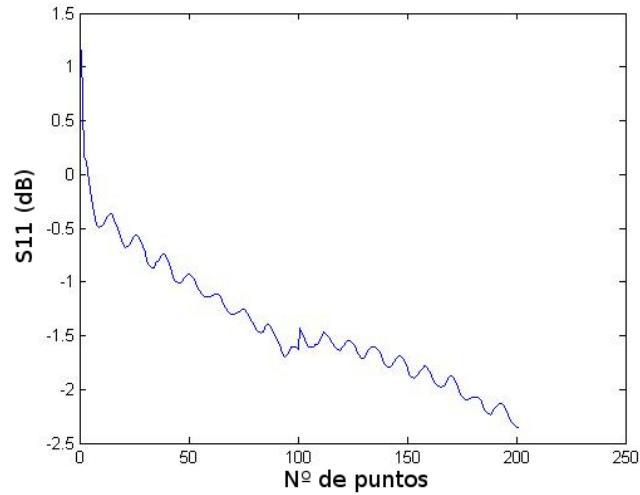


Figura 4.13: Medida de una línea de 11 mm sin calibrar.

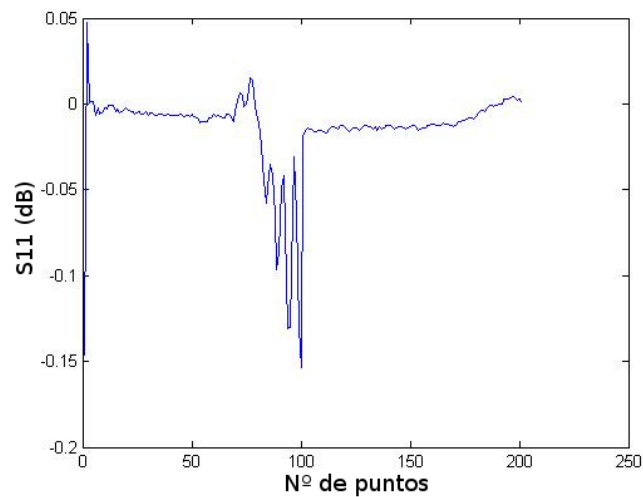


Figura 4.14: Medida corregida de una línea de 11 mm.

4.1.7. Medida línea de una longitud 12 mm

Se procede a medir una línea microstrip de longitud 12 mm. Comparamos los resultados obtenidos con el programa (Figura 4.15) y con aquellos obtenidos teóricamente con las ecuaciones (4.1) y (4.2), y finalmente, calculamos el error relativo mediante la ecuación (4.3).

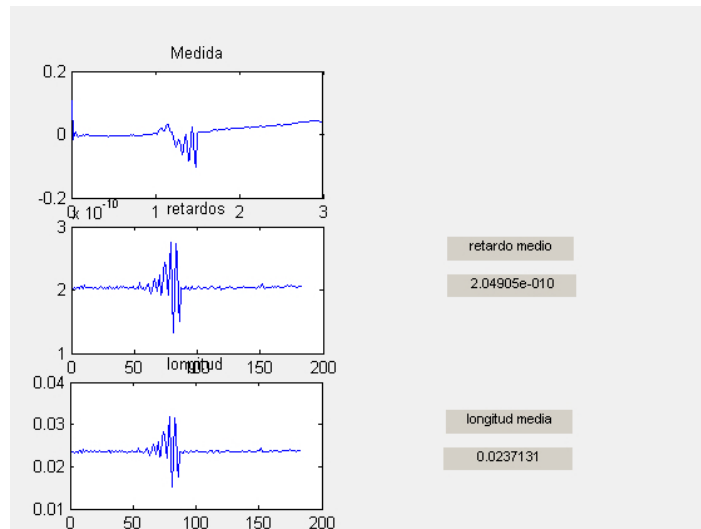


Figura 4.15: Graficas generadas por el programa para una linea de 12 mm de longitud.

- Para el retardo teórico se obtiene un valor de $103,69 \cdot 10^{-12}$ s y el valor medio medido conseguido por el programa es $102,4525 \cdot 10^{-12}$ s.
- Para la longitud el programa ha calculado un valor de 11,85655 mm, siendo el valor real de las características del kit de calibración 12 mm.
- El error relativo para esta medida es de 1,19 %.

Las Figuras 4.16 y 4.17 representan las medidas en reflexión de una línea microstrip de 12 mm antes y después de la calibración.

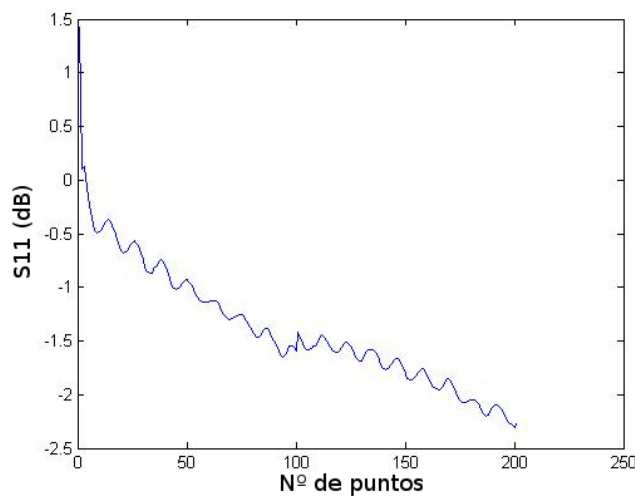


Figura 4.16: Medida de una linea de 12 mm sin calibrar.

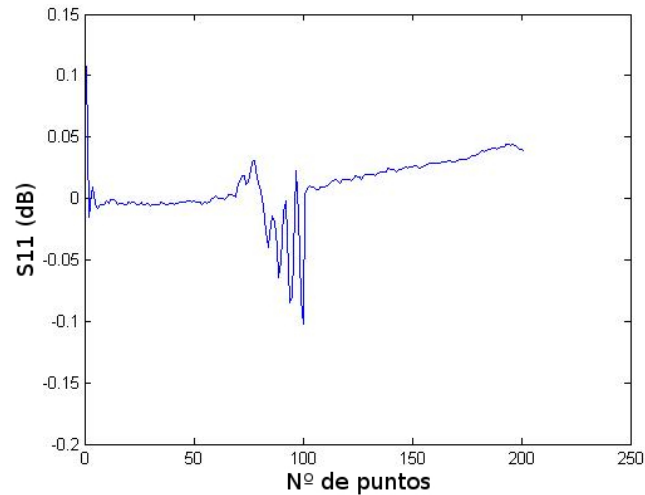


Figura 4.17: Medida corregida de una línea de 12 mm.

4.1.8. Medida línea de una longitud 17 mm

Se procede a medir una línea microstrip de longitud 17 mm. Comparamos los resultados obtenidos con el programa (Figura 4.18) y con aquellos obtenidos teóricamente con las ecuaciones (4.1) y (4.2), y finalmente, calculamos el error relativo mediante la ecuación (4.3).

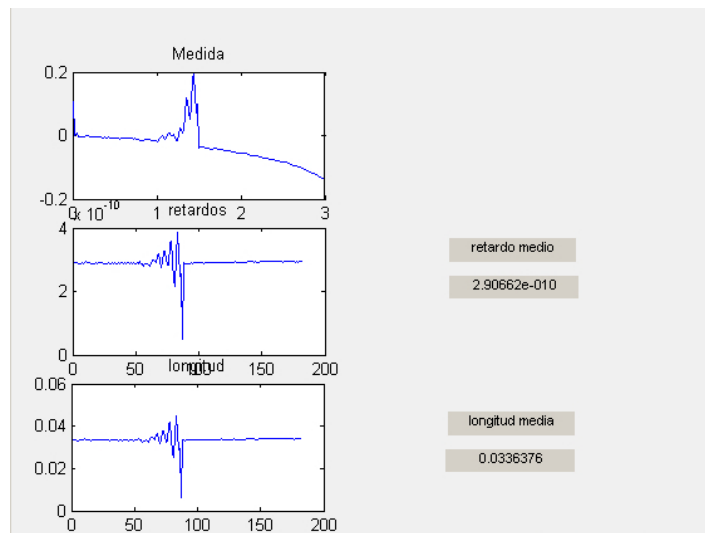


Figura 4.18: Graficas generadas por el programa una linea de 17 mm de longitud.

- Para el retardo teórico se consigue un valor de $146,89 \cdot 10^{-12}$ s y el valor medio medido conseguido por el programa es $145,331 \cdot 10^{-12}$ s.
- Para la longitud el programa ha calculado un valor de 16,8188 mm, siendo el valor real de las características del kit de calibración 17 mm.

- El error relativo para esta medida es de 1,06 %.

Las Figuras 4.19 y 4.20 representan las medidas en reflexión de una línea microstrip de 17 mm antes y después de la calibración.

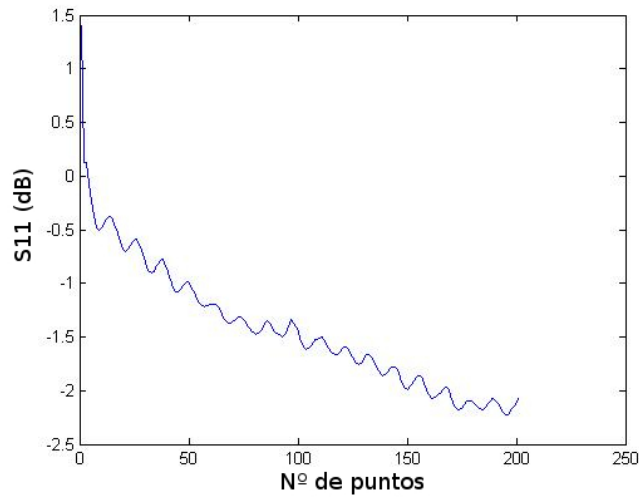


Figura 4.19: Medida de una línea de 17 mm sin calibrar.

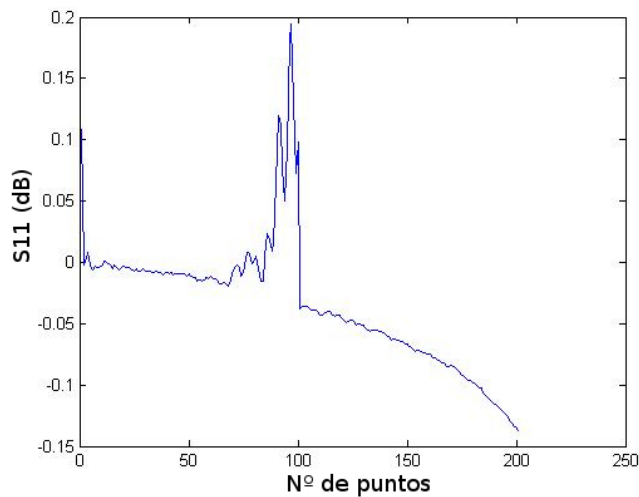


Figura 4.20: Medida corregida de una línea de 17 mm.

4.2. Calibración incompleta normalización THROUGH

En esta sección hemos hecho distintas pruebas, con distintas distancias entre las antenas y colocando planchas de hierro para provocar cambios en las potencias recibidas. Todas las pruebas se han hecho usando la siguiente configuración:

- Frecuencia inicio: 57 GHz
- Frecuencia final: 66 GHz
- Numero de puntos: 1601 puntos
- Filtro IF: 10 Hz
- Potencia en origen: 0 dBm

4.2.1. Calibración directa, distancia 50 cm

Calibración conectando directamente los puertos (Figura 4.21). Se han realizado las pruebas a 50 cm de distancia entre las dos antenas (Figura 4.22). Los resultados obtenidos por el programa (Figura 4.23), muestran varios cálculos antes y después de la calibración. Se pueden sacar las siguientes conclusiones:

- En cuanto a la potencia recibida se puede apreciar que ambas gráficas son muy semejantes en cuanto a forma. Sin embargo la gráfica con la calibración tiene una potencia recibida de 8 dB mayor que la medida sin calibrar.
- En la gráfica de la fase se puede observar como la fase es mas limpia y clara viéndose con mucha mas facilidad los cambios de fase.
- Los resultados del PDP nos dan un valor de distancia para la medida sin calibrar de 2,0346 m y un valor tras la calibración 0,533667 m. La medida es correcta porque también hay que tener en cuenta aparte de los 50 cm de distancia entre las antenas, los 1,5 cm de longitud eléctrica que tienen las antenas.

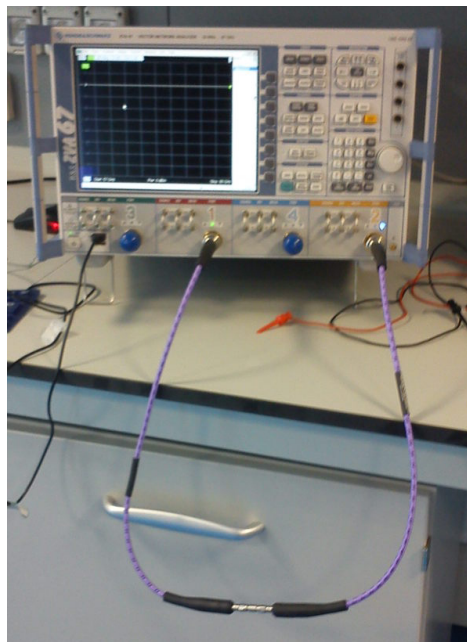


Figura 4.21: Calibración directa.

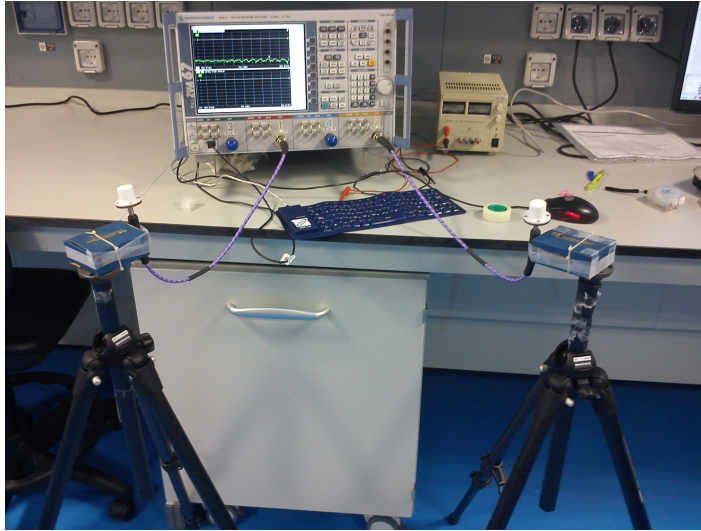


Figura 4.22: Medida a 50 cm.

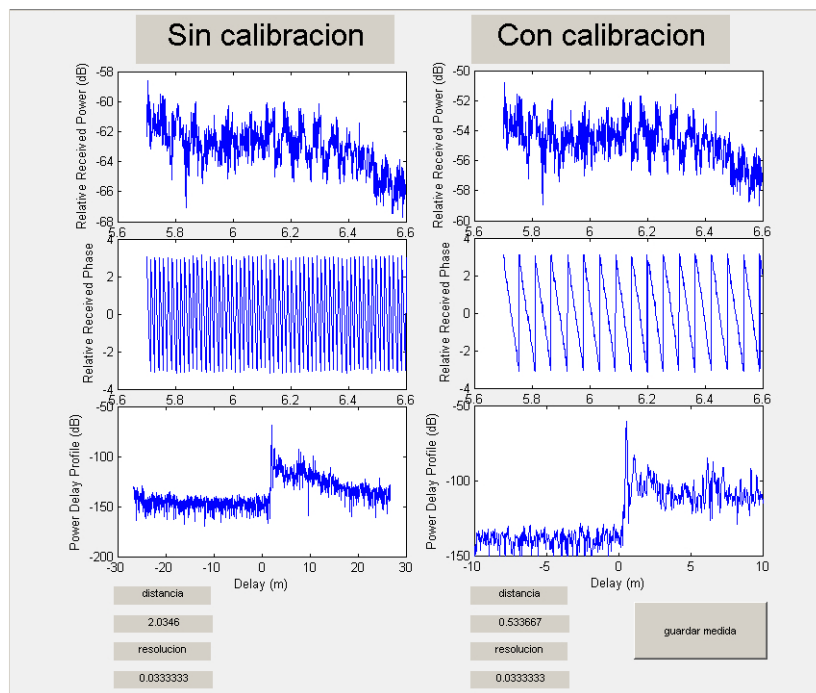


Figura 4.23: Resultados 50 cm.

4.2.2. Calibración cable 30 cm, distancia 1m

Calibración conectando un cable de 30 cm entre los dos puertos del VNA (Figura 4.24). Se han realizado las pruebas a 1 m de distancia entre las dos antenas (Figura 4.25). Se han obtenido los siguientes resultados con el programa (Figura 4.25). Se pueden sacar las siguientes conclusiones:

- La potencia recibida tras haber realizado la calibración es alrededor de 15 dB mayor que la medida sin calibrar.
- En la gráfica de la fase la señal calibrada muestra una fase con un periodo mayor que la señal sin calibrar.
- Los resultados del PDP nos dan un valor de distancia para la medida sin calibrar de 3,00187 m y un valor tras la calibración 1,03398 m. La medida es correcta, se tiene en cuenta la longitud eléctrica de las antenas anteriormente mencionada.

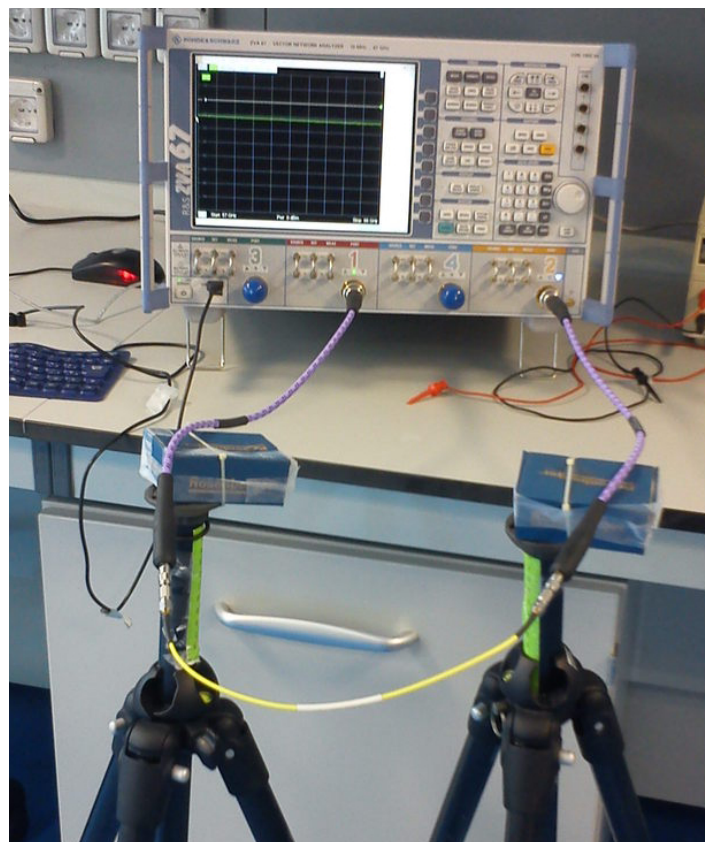


Figura 4.24: calibración usando un cable de 30 cms.

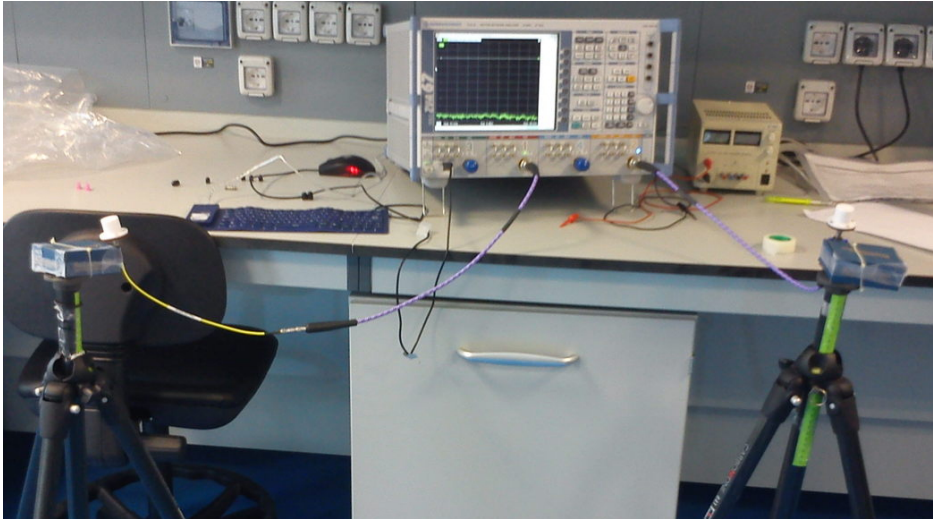


Figura 4.25: Medida a 1 m de distancia.

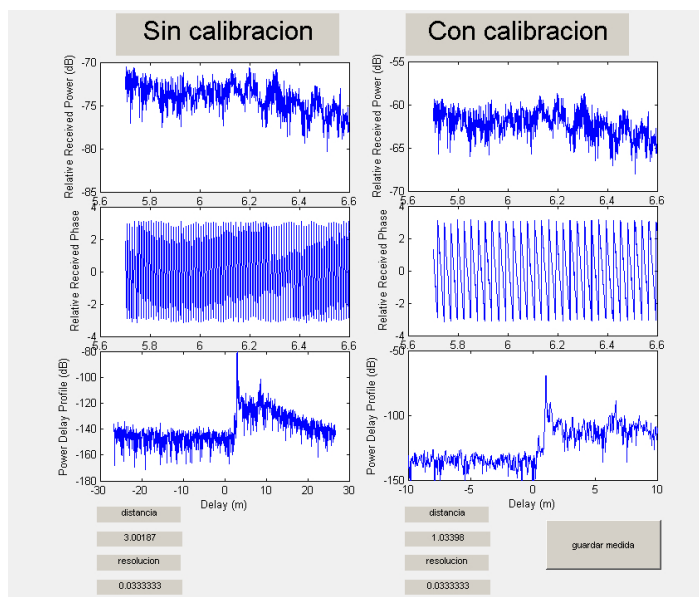


Figura 4.26: Resultados a 1 m de distancia.

Se ha realizado una medida con una chapa de hierro al lado de las antenas de forma que provoque alguna interferencia en la medida (Figura 4.27). Se han obtenido los siguientes resultados por el programa (Figura 4.28).

- Se puede observar como en la gráfica de la potencia ha cambiado con respecto a la gráfica de la potencia de la medida sin ninguna interferencia.
- La fase una vez calibrado es la misma en ambas medidas a pesar de las interferencias creadas por la chapa de hierro.

- El resultado de la distancia calculado por el PDP es el mismo para la medida calibrada.



Figura 4.27: Medida a 1 m con chapa en un lateral para generar interferencias.

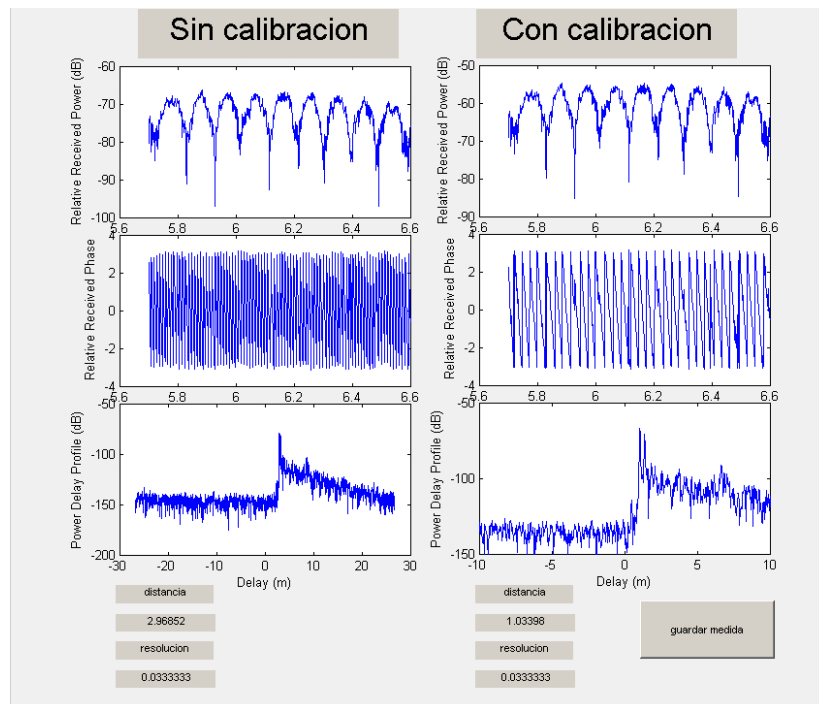


Figura 4.28: Resultados a 1 m de distancia con interferencias.

4.2.3. Calibración cable de 5 m, medida de 3m de distancia

Calibración con cable de 5 m (Figura 4.29), y medidas a una distancia de 3 m entre las antenas. En esta prueba se ha hecho una medida a 3 m de distancia (Figura 4.30). Se han obtenido los siguientes resultados con el programa (Figura 4.31).



Figura 4.29: Calibración con cable de 5m.



Figura 4.30: Medidas a 3 m de distancia con un cable de 5m.

- En esta medida hay 50 dB mas de potencia recibida en la medida tras la calibración.

- El cálculo del PDP nos da un resultado tras la calibración de 3,03523 m, en la medida obtenida antes de calibrar salen 11,3071 m. El resultado es correcto y la gran diferencia obtenida entre los dos cálculos del PDP es debido a la longitud del cable.

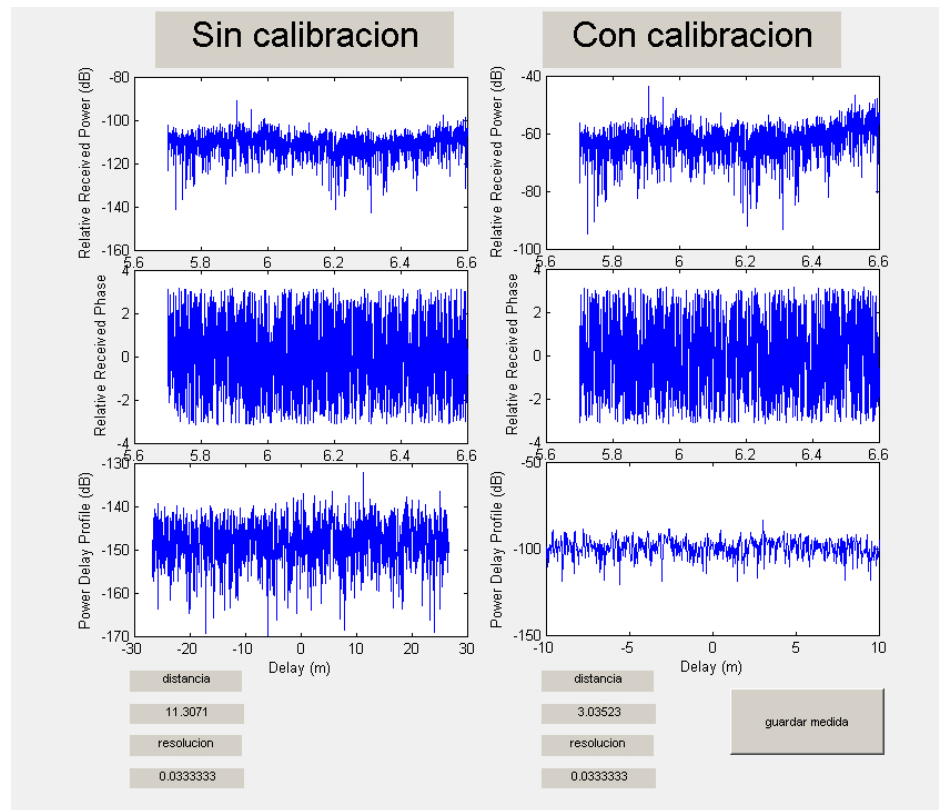


Figura 4.31: Resultados a 3 m de distancia con un cable de 5m.

Capítulo 5

Conclusiones

La calibración para un analizador de red vectorial ha resultado ser un factor muy importante a la hora realizar medidas con una gran precisión. En este proyecto los resultados demuestran que sin una calibración hecha debidamente los datos obtenidos difieren de los datos que se deberían de conseguir.

El proceso de automatización a la hora de tomar medidas es un paso importante debido a la facilidad con la que se pueden tomar medidas sin tener que saber manejar el analizador de red vectorial.

El uso de una carpeta compartida, es una solución simple, fácil de aplicar y si hiciera falta modificar. También tiene sus pega como el tiempo de acceso al disco a través de la red local con lo cual en algunas medidas hubo que añadir retardos para que de tiempo suficiente en terminar de grabar los datos en el disco duro del analizador en la carpeta compartida.

La creación de un sistema de almacenamiento y carga de calibraciones ha resultado muy útil para poder hacer medidas sin tener que estar calibrando el analizador cada sesión en la que se hacían medidas. Es un sistema muy simple que también podría modificarse si la nueva calibración lo necesitará.

Los resultados obtenidos en las pruebas han sido muy positivos dado que las medidas de diferentes longitudes de línea microstrip han dado un error relativo mínimo de 0.06 % y un error relativo máximo de 1.19 %. Hay que tener en cuenta que se dan errores aleatorios de medidas que son producidos normalmente por conectar y desconectar repetidamente las conexiones.

Como principal línea de trabajo a corto plazo será ampliar el programa para realizar otros tipos de calibración. El programa esta creado de forma que las funciones establezcan la configuración del analizador y varias de las pantallas sean comunes para las dos calibraciones que emplea el programa a día de hoy. Esto hace que añadir una nueva calibración sea fácil y, además, se puede reutilizar parte del código. También podrían añadirse mejoras como por ejemplo tomar un numero de medidas y así tener mas valores en cada punto, esto conseguiría una media mas precisa.

Bibliografía

- [1] Michael Hiebel, *Fundamentals of Vector Network Analysis*. Rohde&Schwarz, Second edition 2007.
- [2] Agilent, “Agilent network analyzer basics.”
- [3] A. R. y Nick Ridler, “Calibracion vna.”
- [4] Alejandro Diaz Morcillo, *Lineas de transmision, guias de ondas y cavidades resonantes*. Universidad Politecnica de Cartagena, 2007.
- [5] Jose Luis Gomez Tornero, *Transmision por soporte fisico*. MORPI, S.L., 2006.
- [6] Rohde&Schwarz, “Datasheet zva 67.”

ANEXOS

Anexo A

Anexo A

A.1. Material empleado e instalación

A lo largo de este capítulo se detallaran los distintos instrumentos utilizados en el laboratorio y algunas de sus características.

A.1.1. Material empleado

Analizador vectorial de redes Rohde&Schwarz ZVA-67

Este es el analizador de red vectorial utilizado para el proyecto(Figura A.1). Tiene un sistema operativo Windows XP embebido, para una mayor comodidad, esta característica luego se aprovechara para la compartición de ficheros empleada en este proyecto para pasar los resultados obtenidos en el analizador directamente a MATLAB. Estas son algunas de las características:

- Novedades:
 - 4 fuentes internas de hasta 67 GHz para medidas rapidas en dos tonos de amplificadores y mezcladoras.
 - Generacion de 4 coherentes de fase para señales de hasta 67 GHz.
 - Ancho de banda de 30 MHz para la medición de impulsos de amplificadores y mezcladores.
- Medidas de fase y retardo de grupo con pocas perdidas con o sin acceso al oscilador local.
- Armonicos, compresion, intermodulación y medidas del S_{22} en amplificadores y mezcladores.
- Nuevo metodo para definir la figura de ruido sin ruido en origen.
- Pulso en pulso, pulso medio y medidas de perfiles de pulso.
- Dos generadores de pulso internos.
- Modulador de implusos internos y combinador mediante R&S®ZVAX24.
- Embebido y desembibido adaptador de impedancia usando redes virtuales.

- Medidas reales diferenciadas para caracterizar los efectos no lineales de los dispositivos de equilibrado.
- Variedad de tecnicas de calibración: TOSM, TRL/LRL, TOM, TRM, TNA, UOSM y calibración automatica.

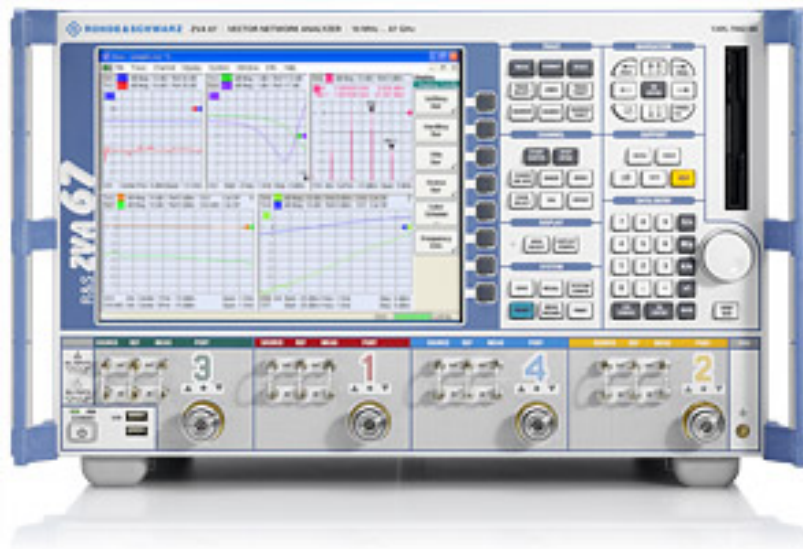


Figura A.1: Rohde&Schwarz ZVA-67.

Datasheet ZVA 67

Specifications

Specifications apply under the following conditions: 90 minutes warm-up time at ambient temperature, specified environmental conditions met, calibration cycle adhered to, and all internal automatic adjustments performed. "Typical values" are designated with the abbreviation "typ.". These values are verified during the final test but are not assured by Rohde & Schwarz. "Nominal values" are design parameters that are not assured by Rohde & Schwarz. These values are verified during product development but are not specifically tested during production.

Unless otherwise stated, specifications apply to test ports and a nominal source power of –10 dBm.

Measurement range

Impedance		50 Ω
Test port connector	R&S®ZVA8	type N, female
	R&S®ZVA24	3.5 mm, male, ruggedized
	R&S®ZVA40	2.92 mm, male, ruggedized
	R&S®ZVA40	2.4 mm, male, ruggedized
	R&S®ZVA50	2.4 mm, male, ruggedized
	R&S®ZVA67	1.85 mm, male, ruggedized
Number of test ports		2 or 4
Frequency range	R&S®ZVA8	300 kHz to 8 GHz
	R&S®ZVA24	10 MHz to 24 GHz
	R&S®ZVA40	10 MHz to 40 GHz
	R&S®ZVA50	10 MHz to 50 GHz
	R&S®ZVA67	10 MHz to 67 GHz
Static frequency accuracy	without optional oven quartz	8×10^{-6}
	with optional oven quartz	1×10^{-7}
Frequency resolution		1 Hz
Number of measurement points	user-selectable	1 to 60001
Measurement bandwidths	1/2/5 steps	1 Hz to 1 MHz
Dynamic range of the R&S®ZVA8 (without optional step attenuators and without optional direct generator/receiver access)	from PORT 1 to PORT 2 and from PORT 3 to PORT 4	
	300 kHz to 50 MHz	> 100 dB, typ. 110 dB
	50 MHz to 100 MHz	> 120 dB, typ. 130 dB
	100 MHz to 4 GHz	> 130 dB, typ. 140 dB
	4 GHz to 7 GHz	> 125 dB, typ. 135 dB
	7 GHz to 8 GHz	> 120 dB, typ. 130 dB
Dynamic range of the R&S®ZVA24 (without optional step attenuators and without optional direct generator/receiver access)	from PORT 1 to PORT 2 and from PORT 3 to PORT 4	
	10 MHz to 100 MHz	> 90 dB, typ. 105 dB
	100 MHz to 700 MHz	> 105 dB, typ. 120 dB
	700 MHz to 2 GHz	> 125 dB, typ. 130 dB
	2 GHz to 13 GHz	> 130 dB, typ. 135 dB
	13 GHz to 24 GHz	> 125 dB, typ. 130 dB
Dynamic range of the R&S®ZVA40 (without optional step attenuators and without optional direct generator/receiver access)	from PORT 1 to PORT 2 and from PORT 3 to PORT 4	
	10 MHz to 50 MHz	> 90 dB, typ. 100 dB
	50 MHz to 500 MHz	> 105 dB, typ. 115 dB
	500 MHz to 2 GHz	> 125 dB, typ. 135 dB
	2 GHz to 20 GHz	> 130 dB, typ. 140 dB
	20 GHz to 24 GHz	> 125 dB, typ. 135 dB
	24 GHz to 32 GHz	> 120 dB, typ. 130 dB
	32 GHz to 40 GHz	> 118 dB, typ. 125 dB
Dynamic range of the R&S®ZVA50 (without optional step attenuators and without optional direct generator/receiver access)	from PORT 1 to PORT 2 and from PORT 3 to PORT 4	
	10 MHz to 50 MHz	> 90 dB, typ. 100 dB
	50 MHz to 500 MHz	> 105 dB, typ. 115 dB
	500 MHz to 2 GHz	> 125 dB, typ. 135 dB
	2 GHz to 20 GHz	> 130 dB, typ. 140 dB
	20 GHz to 24 GHz	> 125 dB, typ. 135 dB
	24 GHz to 40 GHz	> 120 dB, typ. 130 dB
	40 GHz to 45 GHz	> 115 dB, typ. 125 dB
	45 GHz to 50 GHz	> 110 dB, typ. 120 dB

Dynamic range of the R&S®ZVA67 (without optional step attenuators and without optional direct generator/receiver access)	from PORT 1 to PORT 2 and from PORT 3 to PORT 4	
	10 MHz to 50 MHz	> 70 dB, typ. 90 dB
	50 MHz to 500 MHz	> 110 dB, typ. 125 dB
	500 MHz to 2 GHz	> 120 dB, typ. 130 dB
	2 GHz to 8 GHz	> 130 dB, typ. 140 dB
	8 GHz to 12 GHz	> 125 dB, typ. 140 dB
	12 GHz to 24 GHz	> 130 dB, typ. 140 dB
	24 GHz to 32 GHz	> 120 dB, typ. 130 dB
	32 GHz to 40 GHz	> 115 dB, typ. 125 dB
	40 GHz to 50 GHz	> 115 dB, typ. 125 dB
	50 GHz to 65 GHz	> 107 dB, typ. 115 dB
	65 GHz to 67 GHz	> 105 dB, typ. 115 dB
	67 GHz to 70 GHz	typ. 103 dB
The dynamic range is defined as the difference between the actually available maximum source power and the RMS value of the data trace of the transmission magnitude, which is produced by noise and crosstalk with the test ports short-circuited. The specification is valid without system error correction and at 10 Hz measurement bandwidth. The dynamic range can be increased by using a measurement bandwidth of 1 Hz. For the R&S®ZVA67 at single frequencies below 2.5 GHz, the dynamic range may be affected by spurious signals.		

Dynamic range at optional measurement input (direct generator/receiver access option) of the R&S®ZVA8	from PORT 1 to MEAS 2 IN	
	300 kHz to 10 MHz	typ. > 125 dB
	10 MHz to 100 MHz	typ. > 135 dB
	100 MHz to 8 GHz	typ. > 145 dB
Dynamic range at optional measurement input (direct generator/receiver access option) of the R&S®ZVA24	from PORT 1 to MEAS 2 IN	
	10 MHz to 100 MHz	typ. > 135 dB
	100 MHz to 13 GHz	typ. > 145 dB
	13 GHz to 20 GHz	typ. > 140 dB
Dynamic range at optional measurement input (direct generator/receiver access option) of the R&S®ZVA40	from PORT 1 to MEAS 2 IN	
	10 MHz to 100 MHz	typ. > 140 dB
	100 MHz to 20 GHz	typ. > 150 dB
	20 GHz to 24 GHz	typ. > 140 dB
	24 GHz to 32 GHz	typ. > 130 dB
Dynamic range at optional measurement input (direct generator/receiver access option) of the R&S®ZVA50	from PORT 1 to MEAS 2 IN	
	10 MHz to 100 MHz	typ. > 140 dB
	100 MHz to 20 GHz	typ. > 150 dB
	20 GHz to 24 GHz	typ. > 145 dB
	24 GHz to 32 GHz	typ. > 140 dB
	32 GHz to 40 GHz	typ. > 135 dB
Dynamic range at optional measurement input (direct generator/receiver access option) of the R&S®ZVA67	from PORT 1 to MEAS 2 IN	
	10 MHz to 100 MHz	typ. > 140 dB
	100 MHz to 20 GHz	typ. > 145 dB
	20 GHz to 24 GHz	typ. > 145 dB
	24 GHz to 32 GHz	typ. > 140 dB
	32 GHz to 40 GHz	typ. > 135 dB
	40 GHz to 50 GHz	typ. > 130 dB
	50 GHz to 67 GHz	
	typ. > 125 dB	

Para saber mas sobre el analizador se puede recurrir a su datasheet http://www2.rohde-schwarz.com/file_18299/ZVA.dat-sw.en.pdf [6].

Antenas

Para la parte de las pruebas de la calibración incompleta mediante normalización through hemos usado dos antenas QOM55-65 VRA (Figura A.2). Las principales características son:

- Omnidireccionales
- Polarización vertical
- Rango de frecuencia 55-66GHz
- Ganancia de 5 dBi
- Pueden operar tanto en recepción como en transmisión

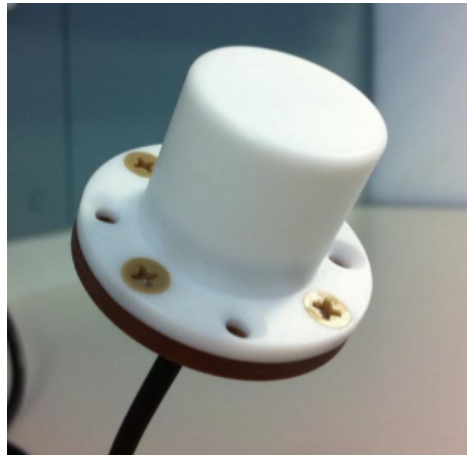


Figura A.2: Antenas QOM55-65 VRA.

Cables

Para las conexiones entre las antenas se han utilizado cables especiales con pocas perdidas (Figura A.3), se ha utilizado un cable de 30 cm y uno de 5 m, para comprobar las perdidas y que la calibración funcionaba con una longitud eléctrica mayor. Todos estos cables tiene una impedancia de 50Ω .

Sistema de medidas microstrip

El aparato de pruebas usado para la calibración OSM con tecnología microstrip empleado ha sido de la marca Anritsu y el modelo 3680k (Figura A.4).

Datasheet sistema de medidas microstrip

Datasheet sistema de medidas microstrip (Figura A.5) y (Figura A.6)..



Figura A.3: Ejemplo de cables usados.

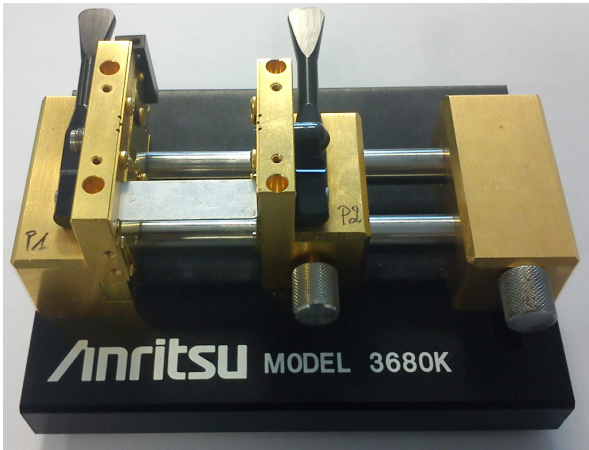


Figura A.4: Sistema de medidas microstrip.

Model		Frequency Range (GHz)	Return Loss (dB)			Repeatability (dB)		
			DC to 20 GHz	20 to 40 GHz	40 to 60 GHz	DC to 20 GHz	20 to 40 GHz	40 to 60 GHz
Universal Test Fixture	3680-20	DC to 20	>17			<±0.10		
	3680K	DC to 40	>17	>14		<±0.10	<±0.20	
	3680V	DC to 60	>17	>14	>8	<±0.10	<±0.20	<±0.30
Right-Angle Launcher	36801K	DC to 40	>16	>12		<±0.15	<±0.25	
	36801V	DC to 60	>16	>12	>7	<±0.15	<±0.25	<±0.40
MMIC Attachment	36802	DC to 60	>12	>8	>6	<±0.20	<±0.40	<±0.60

Figura A.5: Datasheet sistema de medidas microstrip.



Figura A.8: Modelo kit de calibración microstrip.

MICROSTRIP CALIBRATION / VERIFICATION KIT					
QTY	DESCRIPTION				
2	1.000 CM THROUGH LINE				
1	1.070 CM THROUGH LINE				
1	1.100 CM THROUGH LINE				
1	1.200 CM THROUGH LINE				
1	1.700 CM THROUGH LINE				
1	OPEN/SHORT				
1	50 OHM DUAL TERMINATION				
1	OFFSET TERMINATION				
1	BEATTY 30 OHM LINE				
OPEN COEFFICENT	C0	C1	C2	C3	OFFSET (CM)
	-8.0	0.0	0.0	.3	.47

Figura A.9: Datos del kit de calibración microstrip.

A.1.2. Instalación y puesta a punto

Instalación de controladores

El primer paso para poder controlar el analizador de red vectorial de forma remota, es instalar los controladores para que se pueda comunicar el analizador con el ordenador, los controladores se encuentran en la pagina web. Los controladores mínimos para que funcione son los siguientes:

- IVI-COM driver for R&S® ZVA, ZVB, ZVL, ZVT Vector Network Analyzers
- LabVIEW
- LabWindowsCVI
- VXIplug&play Instrument Driver for C#, CC++, Visual Basic .NET, VEE, etc

Además de tener instalados los controladores, el dll llamado “mexrsib.dll” tiene que estar dentro del path de Matlab. Antes de ejecutar la interfaz gráfica es necesario añadir en el path de trabajo la carpeta compartida.

Comunicación entre el analizador y el ordenador

Para pasar los archivos con los resultados de las medidas a través de la red local hemos usado la compartición de ficheros entre los dos equipos, como ambos equipos llevan sistemas Windows basto con que ambos estuvieran en el mismo grupo de trabajo. Luego basto con que el analizador guardara los datos en una carpeta compartida y en matlab hacer un open indicándole la dirección de la carpeta compartida como luego se explicara mas adelante en código.

Anexo B

Anexo B

B.1. Codigos

```
1  function fin=aplicaparametros(fini,ffinal,puntos,fif,pot)
2  %dir nombre del directorio, N , numero de medidas , nombre del archivo
3  %----- Inicializacion -----%
4  global ud;
5      ud=0;
6      ud=mexrsib('ibfind', '192.168.1.1');
7      disp(ud)
8      % Check for valid device handle
9      if ud>0
10         disp('Entra en ud')
11         % Set timeout to 10 s
12         mexrsib('ibtmo',ud,10)
13         % Init device
14         mexrsib('ibwrt',ud,'*RST;*CLS')
15         % Identify the instrument.
16         mexrsib('ibwrt',ud,'*IDN?')
17         IdStr = mexrsib('ilrd',ud,100);
18         disp (IdStr)
19         % Turn display update ON
20         mexrsib('ibwrt',ud,'SYST:DISP:UPD ON')
21         %----- Configuracion parametros medida -----%
22         m = 'SENS1:FREQ:START ';
23         o = 'SENS1:FREQ:STOP ';
24         n = ' Mhz';
25         giga='Ghz';
26         ff = num2str(ffinal);
27         %disp(ff);
28         fi=num2str(fini);
29         %disp(fi);
30         finicio=[m fi n];
31         disp(finicio)
32         ffin=[o ff giga];
33         disp(ffin);
34         mexrsib('ibwrt',ud,finicio)
```

```

35         mexrsib('ibwrt',ud,ffin)
36         p='SENS1:SWE:POIN ';
37         pun=num2str(puntos);
38         c=[p pun];
39         disp(c);
40         mexrsib('ibwrt',ud,c);
41         mb='BAND ';
42         band=num2str(fif);
43         u=' KHz ';
44         fband=[mb band u];
45         disp(fband);
46         mexrsib('ibwrt', ud, fband);
47         q='SOUR:POW ';
48         pow=num2str(pot);
49         potencia=[q pow];
50         disp(potencia);
51         mexrsib('ibwrt', ud, potencia);
52         fin=1;
53         parametros(1:5,1) = ({finicio,ffin,c,fband,potencia});
54         assignin('base', 'parametros', parametros)
55     end
56 end

```

Listado B.1: Codigo inicializacion y entrada de parametros

```

1  mexrsib('ibwrt',ud,'CALCULATE1:PARAMETER:SDEFINE "Trc1","S11"')
2  mexrsib('ibwrt',ud,'DISPLAY:WINDOW:TRACE1:FEED "Trc1"')
3  term=0;
4  mexrsib('ibwrt',ud,'INITiate1:CONTinuous OFF');
5  mexrsib('ibwrt',ud,'INIT;*OPC?')
6  while term==0
7      term=mexrsib('ilrd',ud,1);
8      disp('midiendo, espere por favor')
9      disp(term)
10 end
11 mexrsib('ibwrt',ud,'MMEM:STOR:TRAC "Trc1","C:\Documents and Settings\
    all users\Documents\datosnva\trc1o.dat"');
12 mexrsib('ibloc',ud)
13 disp('MEDIDAS REALIZADAS')
14 finopen=1

```

Listado B.2: Codigo donde mide el estandar open

```

1  openfrec=load('trc1o.dat');
2  openfrec(:,2)=openfrec(:,2)+openfrec(:,3)*i;
3  openfrec(:,3)=[];
4  assignin('base', 'openf', openfrec)

```

```

5  openfrec(:,1)=[];
6  assignin('base', 'open', openfrec)

```

Listado B.3: Creación de las variables con las medidas de los estandar

```

1  e10=(2*(openfrec-matchfrec).*(shortfrec-matchfrec))./(shortfrec-
    openfrec);
2  assignin('base', 'e10', e10)
3  disp('e10 calculado')
4  e10(:,2)=e10(:,1);
5  e10(:,1)=frec(:,1);
6  assignin('base', 'e10f', e10)
7  e10(:,1)=[];
8  e11=(2*matchfrec-shortfrec-openfrec)./(shortfrec-openfrec);
9  disp('e11 calculado')
10 assignin('base', 'e11', e11)
11 e11(:,2)=e11(:,1);
12 e11(:,1)=frec(:,1);
13 assignin('base', 'e11f', e11)
14 e11(:,1)=[];

```

Listado B.4: Calculo de los terminos de error, caso ideal

```

1  omega=2*pi*frec;
2  permitividad=1/3e8;
3  betaopen=omega*sqrt(permitividadopen)*permitividad*2;
4  betashort=omega*sqrt(permitividadshort)*permitividad*2;

```

Listado B.5: Calculo anterior a sacar los terminos con retardo

```

1  e10=((exp(-j.*betaopen.*delayopen)+exp(-j.*betashort.*delayshort)).*(
    openfrec-matchfrec).*(shortfrec-matchfrec))./((exp(-j.*betaopen.*
    delayopen)).*(exp(-j.*betashort.*delayshort)).*(shortfrec-openfrec
    ));
2  assignin('base', 'e10delay', e10)
3  disp('e10delay calculado')
4  e10(:,2)=e10(:,1);
5  e10(:,1)=frec(:,1);
6  assignin('base', 'e10fdelay', e10)
7  e10(:,1)=[];
8  e11=((-exp(-j.*betashort.*delayshort)).*(openfrec-matchfrec)-(exp(-j.*
    betaopen.*delayopen)).*(shortfrec-matchfrec))./((exp(-j.*betaopen
    .*delayopen)).*(exp(-j.*betashort.*delayshort)).*(shortfrec-
    openfrec));
9  disp('e11delay calculado')
10 assignin('base', 'e11delay', e11)
11 e11(:,2)=e11(:,1);
12 e11(:,1)=frec(:,1);

```

```

13 assignin('base', 'e11fdelay', e11)
14 e11(:,1)=[];

```

Listado B.6: Calculo de los terminos de error con retardo

```

1  global parametros;
2  global e11fdelay;
3  global e10fdelay;
4  global e00fdelay;
5  global frecuencias;
6  c=questdlg('Esta seguro de querer guardar la calibracion','Proceso de
    calibracion','Continuar','Cancelar','Cancelar');
7  switch c
8      case 'Continuar'
9          parametros=evalin('base','parametros');
10         e11fdelay=evalin('base','e11fdelay');
11         e10fdelay=evalin('base','e10fdelay');
12         e00f=evalin('base','e00f');
13         frecuencias=evalin('base','frecuencias');
14         uisave({'parametros','e00f','e10fdelay','e11fdelay','
            frecuencias'});
15         finopen=1
16         if finopen==1
17             msgbox('calibracion guardada','Proceso de
                calibracion','modal');
18         end
19     case 'Cancelar'
20         return
21 end

```

Listado B.7: Codigo para guardar la calibración

```

1  mexrsib('ibwrt',ud,'SENS:FUNC:XFR:POW:S21') %
    parametro medir s21
2  mexrsib('ibwrt',ud,'CALCULATE1:PARAMETER:SDEFINE "Trc1","S21"')
3  mexrsib('ibwrt',ud,'DISPLAY:WINDOW:TRACE1:FEED "Trc1"')
4  term=0;
5  mexrsib('ibwrt',ud,'INITiate1:CONTinuous OFF');
6  mexrsib('ibwrt',ud,'INIT;*OPC?')
7  while term==0
8      term=mexrsib('ilrd',ud,1);
9      disp('midiendo, espere por favor')
10     disp(term)
11 end
12 mexrsib('ibloc',ud)
13 mexrsib('ibwrt',ud,'MMEM:STOR:TRAC "Trc1","C:\Documents and Settings\
    all users\Documents\datosnva\throughs21ref.dat');

```



```

14 disp('MEDIDAS REALIZADAS')
15 fints21=1;
16 pause(10)
17 s21ref=load('throughs21ref.dat');
18 s21ref(:,2)=s21ref(:,2)+s21ref(:,3)*i;
19 s21ref(:,3)=[];
20 assignin('base', 's21referencia',s21ref);
21 mexrsib('ibwrt',ud,'SYST:DISP:UPD ONCE');
22 mexrsib('ibwrt',ud,'INIT:CONT OFF')

```

Listado B.8: Codigo que coge la medida de referencia

```

1 mexrsib('ibloc',ud)
2 mexrsib('ibwrt',ud,'MMEM:STOR:TRAC "Trc1","C:\Documents and Settings\
    all users\Documents\datosnva\s21medida.dat"');
3 disp('MEDIDAS REALIZADAS')
4 finmedidas=1
5 pause(20)
6 s21medida=load('s21medida.dat');
7 s21medida(:,2)=s21medida(:,2)+s21medida(:,3)*i;
8 s21medida(:,3)=[];
9 assignin('base', 's21medida',s21medida);
10 s21referencia=evalin('base','s21referencia');
11 s21corregida(:,1)=s21medida(:,1);
12 s21corregida(:,2)=s21medida(:,2)./s21referencia(:,2);
13 assignin('base', 's21corregida',s21corregida);

```

Listado B.9: Codigo donde se hace la normalización

```

1 uiopen('load')
2 assignin('base','parametros', parametros);
3 assignin('base','e11fdelay', e11fdelay);
4 assignin('base','e00f', e00f);
5 assignin('base','e10fdelay',e10fdelay);
6 assignin('base','frecuencias',e10fdelay(:,1));
7 fin=cargaparametros(parametros);
8 if fin==1
9     disp('parametros cargados')
10 end

```

Listado B.10: Carga calibración OSM

```

1 uiopen('load')
2 assignin('base','parametros', parametros);
3 assignin('base','s21referencia',s21ref);
4 fin=cargaparametros(parametros);
5 if fin==1
6     disp('parametros cargados')

```

7 **end**

Listado B.11: Carga calibración THROUGH

```

1  function retardo=calretardos(medida)
2  %calcula una matriz de retardos
3  for i=1:size(medida)-1
4      result1=atan(imag(medida(i,2)/real(medida(i,2))));
5      result2=atan(imag(medida(i+1,2)/real(medida(i+1,2))));
6      frec1=medida(i,1)*2*pi;
7      frec2=medida(i+1,1)*2*pi;
8      retardo(i,1)=-(result1-result2)/(frec1-frec2);
9  end
10 retardo(size(medida),1)=0;
11 end

```

Listado B.12: Calculo de los retardos

```

1  function longitudes=calculalongitud(matriz,permitividad)
2  %calcula un vector de longitud
3  for i=1:size(matriz)
4      longitudes(i,1)=matriz(i)*3000000000/sqrt(permitividad);
5  end
6  end

```

Listado B.13: Calculo de la longitud

Anexo C

Anexo C

C.1. Listado de acrónimos

DUT	Dispositivo de prueba.
RF	Radiofrecuencia.
VNA	Vector Network Analyzer. Analizador de red Vecorial.
SNA	Scalar Network Analyzer. Analizador de red escalar.
AM-PM	Modulación en amplitud-modulacion en fase.
OPEN	Estandar de calibración open (circuito abierto).
SHORT	Estandar de calibración short (corto circuito).
MATCH	Estandar de calibración match (adaptación).
THROUGH	Estandar de calibración through.
PDP	Perfil potencia-retardo. Profile Power-Delay.
OSM	Open, short, match. Modelo de calibracion de 3 terminos de error.
TOM	Through, open, match. Modelo de calibracion de 7 terminos de error.
TRM	Through, reflect, match. Modelo de calibracion de 7 terminos de error.
TRL	Through, reflect, line. Modelo de calibracion de 7 terminos de error.
TNA	Through, network, attenuattor. Modelo de calibracion de 7 terminos de error.
UOSM	Short, match y through desconocido. Modelo de calibracion de 7 terminos de error.

